قصة الكون



جون جريبين

قصة الكون

قصة الكون

تأليف
جون جريبين

ترجمة
د. مصطفى إبراهيم فهمي



قصة الكون
جون جريبين

The Universe: A Biography
John Gribbin

الطبعة الثانية ١٤٣٢هـ-٢٠١١م
رقم إيداع ٢٠١٠/١٦٠٤٦
جميع الحقوق محفوظة للناشر كلمات عربية للترجمة والنشر
(شركة ذات مسئولية محدودة)

كلمات عربية للترجمة والنشر
إن كلمات عربية للترجمة والنشر غير مسئولة عن آراء المؤلف وأفكاره
وإنما يعبّر الكتاب عن آراء مؤلفه
مكتب رقم ٤، عقار رقم ٢١٩٠، زهراء مدينة نصر، القاهرة
جمهورية مصر العربية
تليفون: ٢٢٧٢٧٤٣١ ٢٠٢+ **فاكس:** ٢٢٧٠٦٣٥١ ٢٠٢+
البريد الإليكتروني: kalimat@kalimat.org
الموقع الإليكتروني: http://www.kalimat.org

جريبين، جون
قصة الكون / جون جريبين؛ ترجمة مصطفى إبراهيم فهمي . - القاهرة : كلمات عربية للترجمة والنشر، ٢٠١٠.
٢٩٦ص، ١٤,٥×٢١,٠سم
تدمك: ٤ ٦٠ ٦٢٦٣ ٩٧٧ ٩٧٨
١- الكون
أ- فهمي، مصطفى إبراهيم (مترجم)
ب- العنوان
٥٢٣,١

المحتويات

قصة الكون

يعد جون جريبين أحد أعظم الكتاب المعاصرين في مجال العلوم المبسطة، ومؤلف العديد من الكتب الأكثر مبيعًا، من بينها البحث عن قطة شرودينجر،[١] وغبار النجوم،[٢] وتاريخ العلم،[٣] والبساطة العميقة،[٤] والجماعة.[٥] ويشتهر جون بين جمهوره العريض بقدرته على تبسيط الأفكار المعقدة، ويقول إن الهدف الذي ينشده من وراء كتاباته — التي ينجز أغلبها بمساعدة زوجته ماري جريبين — هو أن ينقل لقرائه إحساسه بالانبهار من غرابة الكون. درس جون الفيزياء الفلكية في جامعة كيمبريدج، ويحتل حاليًّا منصب زميل زائر لقسم علم الفلك بجامعة ساسكس. يستمتع جون في وقت فراغه بتأليف قصص الخيال العلمي، ويؤلف أغلب كتبه في غرفة بحديقة منزله الخلفية.

---

[١] In Search of Schrödinger's Cat.

[٢] Stardust.

[٣] Science: A History.

[٤] Deep Simplicity.

[٥] The Fellowship.

من أجل بين وإيلي

ليس ما يميز رجل العلم هو «ما الذي» يؤمن به، وإنما «كيف» و«لماذا» يؤمن به. إن معتقدات رجل العلم ليست نهائية ولا دوجماتية، إنها معتقدات تعتمد على الأدلة، وليس على الخبرة أو الحدس.

بيرتراند راسل
(١٨٧٢–١٩٧٠)

شكر

معظم الأبحاث في كتبي الحديثة قد تطلبت التنقيب في ملفات أرشيف مترِبة وقراءة تقارير غير مباشرة (في أحسن وصف) حول حياة وأبحاث أفراد قد ماتوا. إلا أنني في عملي هذا الكتاب تحدثت إلى أفراد أحياء حول أبحاثهم الخاصة، وإذا كان في هذا ما يثير حيرة وحرجًا إلا أن فيه نوعًا من تغيير ممتع. على أن هدفي هنا هو أن أعطي نظرة شاملة عما يدور حاليًّا في العلوم الفيزيائية، ولهذا السبب فإني نادرًا ما أشرت بالاسم إلى الأفراد أو إلى أجزاء مفردة من البحث، في النص الرئيسي. إذا كنت قد تعلمت شيئًا واحدًا من كتاباتي لكتبي التي تتجه أكثر إلى المنحى التاريخي، فهو أن العلم نشاط جماعي. كلمة «نحن» التي تظهر في النص تشير إلى كل مجموعة العلماء، في الماضي والحاضر، ممن أسهموا في فهمنا للكون الفيزيائي ولكني ما كنت أستطيع تأليف هذا الكتاب لولا ما أجريته من مناقشات ومراسلات مع الكثيرين من أفراد الباحثين، سواء أكان ذلك بوجه خاص من أجل هذا الكتاب أم لمناسبات أخرى عبر السنين، وأنا هكذا أود أن أقدم الشكر لكل من كيفورك أبازاجيان، وجون باكال، وجون بارو، وفرنك كلوز، وإد كوبلاند، وبيير-ستيفانو كراسنتي، وجون فولكنر، وإجناسيوفيريراس، وسيمون جودوين، وآن جرين، وبن جريبين، وآلان جوث، ومارتن هندري، ومارك هندمارش، وجلبرت هولدر، وإيزوبل هوك، وجيم هاف، وستيف كنج، وكريس لادرو، وأوفر لاهاف، وأندرو ليدل، وأندريه لند، وجيم لوفلوك، وجابرييلا دي لوسيا، ومايك ماك أنتير، وإيليا مسكو، وجايانت نارليكار، ومارتن ريز، وليزيك روزكوسكي، وبي ساثيا

براكاش، وريتشارد سافيج، وبيتر شرودر، وبروس سلجاك، ولي سمولين، وآدم ستانفورد، وبول شتاينهاردت، وكريستين ستون، وبيتر توماس، وكيب ثورن، وإد تريون، ونيل توروك، وأيان وادينجتون، وذلك لما بذلوه كلهم من استجابة كريمة لإشراكي في أفكارهم. بالعودة وراء لما هو أبعد، أجد أن عليَّ دين لا يمكن أن أفي به للعديد من العلماء الذين لم يعودوا بعد معنا؛ وهم حسب ترتيب ما بذلوا من فيض جهدهم لي، بيل ماك كريا، وفريد هويل، وويلي فولر، وروجر تيلر، وجون ماينارد-سميث.

أود أن أشكر أيضًا كريستين ودافيد جلاسون، وهما المسئولان عن جعلي أنال فترات راحة من العمل من حين لآخر؛ وكذلك أقدم شكري لمؤسسة ألفريد سي مونجر، التي منحتني إسهامًا كريمًا في رحلات سفري ونفقات البحث الأخرى، كما أقدم الشكر لجامعة ساسكس التي وفرت لي مقر قاعدة لعملي.

إلا أنه كما هي العادة، فإن أعظم إسهام أتى من وراء الكواليس من شريكتي الموجودة معي أبدًا وإن كانت غير مرئية على الدوام، ماري جريبين.

تمهيد

قصة الكون

عندما شرعت في تأليف كتب حول العلوم منذ أكثر من ثلاثين عامًا، ظننت في البداية أنني أتعامل مع حقائق قاطعة، مثل قوانين نيوتن، وحركة القارات على سطح الأرض، وإطلاق النجوم الطاقة من خلال عملية الاندماج النووي التي تحدث في أعماقها، وما إلى ذلك. وبمرور الوقت عندما بدأت أهتم أكثر فأكثر بتاريخ العلم والسير، حيرتني حقيقة أن هذه البحوث غير موضوعية وقابلة للتأويل إلى حد ما. يستحيل أن نكتب تاريخ العلم (أو تاريخ أي شيء آخر) لأننا لا نملك كل الحقائق، وعلينا أن نملأ الفجوات بالاستدلال، وإن كان استدلالًا قائمًا على المعرفة يعتمد على كل الحقائق التي لدينا. وبالمثل أيضًا يستحيل كتابة سيرة إنسان (حتى لو كان لا يزال على قيد الحياة) لأن ذاكرة الإنسان غير معصومة من الخطأ والسجلات غير كاملة. وأدركت أخيرًا أن نفس الحدود تسري على أي محاولة لكتابة تاريخ الكون أو قصته. فعلى الرغم من أننا نملك قدرًا كبيرًا من المعلومات عن الطريقة التي تكّون بها الكون منذ الانفجار العظيم، بل وتتسم هذه المعلومات في بعض الحالات بالدقة المتناهية، فإن هناك دائمًا فجوات في هذه المعرفة، وفي تلك الحالة لا بد أن نستخدم الاستدلال المتقن لنستنتج ما حدث. لذا لن يكون هناك تاريخ واحد أو سرد واحد قاطع

لتاريخ الكون؛ وإنما قصص غير موضوعية نوعًا ما مختلفة وتأويلات متعددة.

وكل هذا جعلني أفكر في إمكانية كتابة سرد لقصة الكون وتطوره ومصيره المحتمل باستخدام المنهج الذي كنت سأستخدمه إذا شرعت في كتابة إحدى السير، وذلك بأن أسأل الأسئلة الرئيسية حول الموضوع، ثم أحاول أن أجيب عليها بأفضل طريقة ممكنة، محاولًا ملء الفجوات عند الحاجة باستخدام الاستدلال القائم على المعرفة. كيف بدأ الكون؟ من أين أتت الجُسيمات المادية التي صنعنا منها؟ من أين أتت المجرات؟ كيف تتشكل النجوم والكواكب؟ كيف بدأت الحياة. لدينا فقط إجابات مؤقتة عن هذه الأسئلة (بعضها مؤقتة أكثر من غيرها)، ولكنها كلها إجابات من المرجح أنها ستتحسن تحسنا كبيرًا بما سيحدث من تقدم علمي خلال السنوات العشر التالية. ما لدينا بالفعل من إجابات مؤقتة هو أفضل إلى حد هائل من ألا تكون هناك أي إجابات مطلقًا، وقصة توصلنا إلى هذه الإجابات قصة تستحق في حد ذاتها أن تروى، وفي ذلك أيضًا طريقة جيدة للتمهيد للقصص التي يرجح أنها ستكون عناوين الصحف الرئيسية خلال العقود الآتية.

عندما كتبت تاريخي للعلم منذ القرن السادس عشر[١] استخدمت أسلوبًا يختلف عما هو متبع عند كتابة السير من خلال التركيز على حياة وإنجازات العلماء. في البداية، اعتزمت استخدام الأسلوب نفسه هنا آملًا أن أعطي بذلك فكرة عن طريقة عمل العلم حاليًّا عندما أركز على الإسهامات الفردية. إلا أن العلم يؤدَّى في هذه الأيام بطريقة مختلفة. كلما زادت زياراتي للعلماء النشطين اليوم، زاد إدراكي لمدى التغير الكبير في العلم أثناء حياتي. يركز العلماء في مجالات العلوم الفيزيائية في الوقت الحاضر بوجه عام على مشاكل صغيرة نسبيًّا أثناء عملهم في فرق كبيرة نوعًا، بحيث إنه غالبًا ما يكون من الصعب تحديد إسهاماتهم الخاصة بهم، أو الزعم بأن المشروع ما كان سينجح هكذا لو أن فردًا آخر كان سيؤدي مهمتهم. على أن الحصيلة ككل

[١] كتاب تاريخ العلم، ألان لين، لندن ٢٠٠٢.

تصبح أعظم من مجموع أجزائها، حتى إنه تنبثق عن ذلك صورة متينة متسقة تفرض نفسها وتكاد تكون مكتملة إلى أبلغ حد، وتبين طريقة عمل عالَم الفيزياء، وكيف أن الكون الذي نراه من حولنا يجب أن يكون كما هو. أحد أروع الملامح لهذه القصة هو أن لغز أصل الحياة يقع الآن مباشرة في نطاق علم الفيزياء (وهو الآن أقل إلغازًا إلى حد بعيد مما كان عليه عادة).

لا يصبح مقياس هذا الإنجاز واضحًا إلا عندما نتراجع لننظر من بعيد عن الإسهامات الفردية ناظرين إلى الصورة الكبيرة. هناك «بالفعل» قصة رائعة لسيرة حياة علمية يجب كتابتها، ولكنها سيرة حياة الكون نفسه، وليس الأفراد الذين يسبرون ما تبقى فيه الآن من الألغاز. لما كانت حياة الكون بعيدة عن الوصول إلى نهايتها، فقد اخترت أن أطرح القصة حتى الآن بلغة من البدايات، من بداية الكون كما نعرفها عندما يقرب من ١٤ مليار سنة (١٠^٩) حتى بداية الحياة على الأرض بعد ذلك بعشرة مليارات سنة. لم أستطع كذلك أن أقاوم اختلاس نظرة إلى المستقبل، للنظر في المصير المرجح للأرض، وهو أمر يثير اهتمامًا له قدره عند سكان كوكبنا، وسكان الكون عمومًا.

بعض الخطوط الخارجية لهذه القصة قد رُسمت مجملة من قبل،[٢] إلا أن الأمر المختلف في علم القرن الحادي والعشرين هو أن الخطوط الخارجية قد مُلئت بدقة (وتغيرت أحيانًا تغيرًا دراميًّا في هذه العملية) بحيث إن الأرقام الرئيسية أو المفتاحية التي تعّين حالة الكون أصبحت معروفة بدقة تصل إلى نسبة من عدد صغير في المائة، أو حتى إلى كسور من الواحد في المائة. تبيّن في الوقت نفسه أن هناك أجزاءً مختلفة من الصورة تتوافق بدقة مذهلة، بحيث نجد مثلًا أن خصائص النيوترون (أحد مكونات نواة الذرة) التي تقاس في المعمل لها علاقة وثيقة حميمة بالأحداث التي وقعت في الانفجار الكبير، وكذلك بمقدار الهيليوم الموجود حاليًّا في النجوم. كما أن مقدار الهيليوم في النجوم يؤثر بدوره في إنتاج العناصر الكيميائية التي انتهت بالوصول إلى أجسادنا، وله كذلك علاقة مهمة بقصة أصل الحياة.

---

[٢] في كتاب سابق لي بعنوان «التكوين» *Genesis* (دار نشر دينت، لندن، ١٩٨٠) وفي كتابات عدة كتاب آخرين.

وذلك هو السبب الآخر الذي دفعني إلى تسمية الكتاب «قصة الكون» بدلًا من «تاريخ الكون». فهو يتناول نشأة الحياة ويطرح السؤال المطلق المتعلق بأصولنا، على الرغم من أن ذلك قد لا يكون واضحًا في الفصول الأولى من الكتاب.

يعد هذا الكتاب سيرة لتاريخ الكون وليس سيرة تاريخ الكون؛ لكن على الرغم من أنه بالقطع سيكون كتابًا تخمينيًّا إلى حد ما، فإنني لا أود أن تظن أنه يقوم على خيالي الشخصي، فالحقائق الواردة هنا تفوق ما ورد به من تخمين. وكأي كاتب سيرة بارع، فإنه قبل تناول هذا المفهوم الجديد حول العالم ومكاننا فيه، علي أن أفكر مليًّا في الأمور التي صار علماء الفيزياء على يقين منها بشأن طريقة عمل الكون، وأن أميز بين ما نظن أننا «نعرفه» وما «نظن» أننا نعرفه.

جون جريبين
مايو/أيار ٢٠٠٦

الفصل الأول

كيف نعرف الأشياء التي نعتقد أننا نعرفها؟

ما الذي يعنيه العلماء عندما يقولون إنهم «يعرفون» ماذا يجري مثلًا داخل إحدى الذرات، أو ماذا حدث في أول ثلاث دقائق من حياة الكون؟ إنهم يعنون أن لديهم ما يسمونه نموذجًا للذرة، أو للكون المبكر أو لأي مما يهتمون به، وأن هذا النموذج يتوافق مع نتائج تجاربهم أو ملاحظاتهم عن العالم. هذا النموذج العلمي ليس تمثيلًا فيزيقيًّا للشيء الحقيقي بالطريقة التي يمثل بها نموذج لطائرة طائرة كاملة المقاييس؛ وإنما هو صورة ذهنية تصفها مجموعة من المعادلات الرياضية. وكمثل لذلك فإن الذرات والجزيئات التي تشكل الهواء الذي نتنفسه يمكن وصفها بلغة من نموذج نتخيل فيه أن كل جسيم يكون له شكل متقن بكرة صغيرة مرنة (كرة بلياردو بالغة الصغر)، وكل هذه الكرات الصغيرة ترتد متواثبة إحداها عن الأخرى وعن جدران الوعاء الحاوي لها.

هذه هي الصورة الذهنية، إلا أن هذا هو نصف النموذج فقط؛ إن ما يجعله نموذجًا «علميًّا» هو أن طريقة تحرك الكرات وارتدادها متواثبة إحداها عن الأخرى يجري وصفها بمجموعة من القوانين الفيزيائية تكتب بلغة من المعادلات الرياضية. في هذه الحالة، فإن هذه القوانين هي أساسًا قوانين الحركة التي اكتشفها نيوتن منذ أكثر من ثلاثمائة سنة. من الممكن باستخدام هذه القوانين الرياضية أن نتنبأ مثلًا بما سيحدث لضغط الغاز عندما يُحشر في نصف حجمه الأصلي. إذا أجرينا هذه التجربة فسنحصل

على نتيجة (هي في هذه الحالة أن يتضاعف الضغط) تتفق مع ما يتنبأ به النموذج، الأمر الذي يجعل منه نموذجًا صالحًا.

ينبغي بالطبع ألا نندهش من أن النموذج المعياري لأحد الغازات الذي يصفه بلغة من كرات صغيرة ترتد متواثبة إحداها عن الأخرى بما يتفق وقوانين نيوتن يصنع لنا هذا التنبؤ الصحيح بعينه، لأن التجارب قد أُجريت أولًا وصُمم النموذج أو بُني ليتلاءم مع نتائج التجارب. المرحلة التالية لذلك في العملية العلمية هي أن نستخدم النموذج الذي أنشأناه من المقاييس التي أُجريت في مجموعة من التجارب حتى نصنع منه تنبؤات (تنبؤات رياضية دقيقة) حول ما سيحدث للمنظومة نفسها عندما نجري تجارب مختلفة. إذا صنع النموذج التنبؤات «الصحيحة» تحت الظروف الجديدة، فإن هذا يبين أنه نموذج صالح. وحتى إذا أخفق النموذج في صنع التنبؤات الصحيحة فربما لا نضطر لنبذه بالكامل، ذلك أنه لا يزال يخبرنا بشيء مفيد بشأن التجارب الأقدم؛ على أنه في أحسن الأحوال له قدرة تطبيقية محدودة.

الحقيقة أن كل النماذج العلمية لها قدرة تطبيقية محدودة. فأي واحد منها لا يكون هو «الحقيقة». نموذج الذرة كشكل متقن لكرة صغيرة تامة المرونة ينجح جيدًا في حساب تغيرات ضغط الغازات في الظروف المختلفة، ولكننا إذا أردنا أن نصف الطريقة التي تبعث بها الذرة الضوء أو تمتصه، فسنحتاج إلى نموذج للذرة يكون لها فيه على الأقل مكونان اثنان: نواة مركزية بالغة الصغر (يمكن النظر إليها هي نفسها لأغراض معينة باعتبار أن لها شكلًا متقنًا لكرة صغيرة مرنة) تحيط بها سحابة من الإلكترونات. النماذج العلمية تمثيل للواقع، وليست هي الواقع نفسه، وأيًّا كان نجاح أدائها أو دقة تنبؤاتها في الظروف الملائمة، فإنها ينبغي أن تعد دائمًا أنواعًا من التقريب وأدوات للمساعدة على التصور، وليست الحقيقة النهائية. عندما يقول لنا العلماء مثلًا إن نواة الذرة تتألف من جسيمات تسمى البروتونات والنيوترونات، فإن ما ينبغي أن يقولوه حقًّا هو أن نواة الذرة في ظروف معينة تسلك «وكأنها» تتألف من بروتونات ونيوترونات. كبار العلماء يأخذون عبارة «وكأنها» على أنها مسلم بها، ولكنهم يدركون

أن نماذجهم هي حقًّا لا تعدو أن تكون نماذج فحسب؛ صغار العلماء كثيرًا ما ينسون هذا التمييز الحاسم.

هناك فكرة أخرى خاطئة عند صغار العلماء وغير العلميين، فهم كثيرًا ما يعتقدون أن دور العلماء حاليًّا هو إجراء تجارب تثبت صحة نماذجهم بدرجة أكثر وأكثر دقة، بما يصل إلى نسبة من مزيد ومزيد من خانات الكسور العشرية. الأمر ليس هكذا مطلقًا! السبب في إجراء تجارب لسبر تنبؤات النماذج التي لم تختبر فيما سبق هو أن نكتشف نقاط ضعف النماذج. إنه لمن أعز الآمال عند أفضل الفيزيائيين أن يعثروا على أخطاء في نماذجهم، لأن هذه الأخطاء — أو الأمور التي لا تستطيع النماذج أن تتنبأ بها بدقة أو لا تستطيع أن تفسرها بالتفصيل — ستلقي الضوء على المواضع التي نحتاج فيها إلى فهم جديد وإلى نماذج أفضل لإحراز التقدم. المثال النموذجي لذلك هو الجاذبية. ظل قانون إسحاق نيوتن عن الجاذبية يُعد أعمق جزء في الفيزياء لما يزيد عن مائتي سنة، ابتداء من ثمانينيات القرن السابع عشر حتى بداية القرن العشرين. على أنه كانت هناك أمور قليلة تبدو ضئيلة الشأن لم يستطع النموذج النيوتوني أن يفسرها (أو يتنبأ بها)، بما في ذلك مدار كوكب عطارد وطريقة انحناء الضوء عندما يمر عبر الشمس. صمم ألبرت أينشتاين نموذجه للجاذبية على أساس نظريته عن النسبية العامة،[١] وهو نموذج يفسر كل شيء يفسره نموذج نيوتن، ولكنه يفسر «أيضًا» تلك التفاصيل الدقيقة لمدارات الكواكب وانحناء الضوء. وبهذا المعنى فإن نموذج أينشتاين أفضل من نموذج نيوتن الأقدم، وهو يصنع تنبؤات صحيحة (خاصة عن الكون عمومًا) لا يصنعها النموذج الأقدم. إلا أن نموذج نيوتن لا يزال هو كل ما نحتاجه عندما نحسب مسار طيران مسبر فضائي من الأرض إلى القمر. «نستطيع» إجراء الحسابات نفسها باستخدام النسبية العامة، ولكن هذا سيكون أكثر إرهاقًا وإملالًا وسيعطينا الإجابة نفسها، إذن فلماذا نزعج أنفسنا بذلك؟

[١] مصطلح «النظرية» كثيرًا ما يستخدم لوصف ما أسميته أنا بالنماذج. وأنا أفضل كلمة النموذج لأنها بالنسبة لغير العلماء تحمل معها معاني أقل تضليلًا مما تحمله كلمة «النظرية»، إلا أنه في بعض الحالات، وبوجه خاص في حالة نظرية أينشتاين، نجد أن كلمة النظرية تشكل إلى حد بعيد جزءًا من الاسم بحيث لا يمكن تفاديها. وعلى أي حال فإن كل ما قلته عن النماذج العلمية ينطبق أيضًا على النظريات العلمية. (المؤلف)

يدور معظم هذا الكتاب حول أمور «نعتقد» أننا نعرفها؛ نماذج تبدو صالحة بمدى ما تُختبر به، ولكنها تتضمن العلم المنبثق، وهو علم لا يزال هناك المزيد من الاختبارات الكثيرة التي يجب إجراؤها عليه. من المؤكد أن بعض هذه النماذج سيتطلب تعديلًا في ضوء المزيد من التجارب والملاحظات الأخرى عن الكون؛ وقد يلزم نبذ بعضها بالكامل وأن يحل مكانه طرائق جديدة للنظر في الأمور. ولا يختلف هذا عما حدث مع المؤرخين وكتاب السير الذين تناولوا حياة روبرت هوك، وهو واحد من أعلام الثورة العلمية في القرن السابع عشر، إذ اضطروا أخيرًا إلى تنقيح أفكارهم عن هذا العالم (أو نماذجهم إذا شئت) بعد اكتشاف وثيقة هامة ظلت مفقودة طوال قرون، وتتناول الوثيقة تفاصيل بعض الأحداث في حياة هوك العلمية.

على أننا حتى نعد المشهد لوصف المسار الذي سيتجه إليه العلم في القرن الحادي والعشرين، سنحتاج إلى أن نبدأ من الأمور التي نعتقد أننا «نعرفها»؛ نماذج نشأت أساسًا في القرن العشرين، وكانت جد ناجحة في التلاؤم مع نتائج التجارب والملاحظات، حتى إن لدى العلماء إيمانًا كبيرًا بها يماثل إيمانهم بنماذج كرة البلياردو للغازات في نموذج نيوتن للجاذبية (في نطاق قيوده المحددة المعروفة). هذه النماذج هي — مثل نموذج نيوتن — قريبة جدًّا من الكمال في وصفها للكون الفيزيائي في نطاق المجالات المعينة التي يعرف عن هذه النماذج أنها تنطبق عليها. ومن المهم هنا، كما هو مهم في نموذج نيوتن، أننا نعرف أين تكون حدود القدرة التطبيقية لهذه النماذج.

يحب الفيزيائيون الإشارة إلى أوصاف العالم الناجحة نجاحًا بالغًا (أو الأولى أنها الملامح الخصوصية للعالم) على أنها نماذج «معيارية». نموذج كرات البلياردو عن الغازات (ويعرف أيضًا بأنه النظرية الحركية لأنه يتناول الجسيمات وهي في حركة) هو نموذج معياري. ولكن عندما يتحدث الفيزيائيون عن النموذج المعياري، فإنهم يشيرون بذلك إلى أحد أعظم انتصارات العلم في القرن العشرين، أي يشيرون إلى النموذج الذي يصف سلوك الجسيمات والقوى بمستويات ما تحت الذرة. هذا وقد بدأ ذلك أساسًا في العقد الثاني من القرن العشرين، عندما اكتشف الفيزيائي الدنمركي نيلز بور نموذجًا جديدًا للذرة. سبق أن وصفتُ النشأة التاريخية

لفيزياء الكم في كتابي «بحثًا عن قطة شرودينجر» (١٩٨٤)، ولا أنوي هنا الدخول في تفاصيل ذلك؛ على أنه لما كان النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات يتأسس كليًّا على فيزياء الكم، فإن من المناسب أن نذكر ملخصًا موجزًا له. قد يبدو بعض هذا لأول وهلة شيئًا مألوفًا لبعض القراء؛ ولكني أناشدهم التأني معي، لأني آمل أن القارئ قد يجد أن تناولي لهذه القصة المألوفة لا يماثل تمامًا ما يعتقد أنه يعرفه.

أول خطوة تجاه هذا الفهم الجديد للفيزياء اتخذها ماكس بلانك في ألمانيا عند بداية القرن العشرين. اكتشف بلانك أن الطريقة الوحيدة التي يمكن بها تفسير الملاحظات عن طريق إشعاع الضوء من الأجسام الساخنة هي بأن ينبعث الضوء في تكتلات صغيرة، حزم تسمى الكمات. كان العلماء وقتها ينظرون إلى الضوء كشكل من موجة، ذبذبة كهرومغناطيسية، وذلك لأن ملاحظة سلوك الضوء في تجارب كثيرة تتفق مع تنبؤات نموذج الموجة. في أول الأمر، لم يكن بلانك نفسه أو أي من معاصريه يعتقد أن الضوء «موجود» في شكل تكتلات صغيرة، وإنما وجدوا فحسب أن خواص المادة — أي خواص الذرات — تعني أنه يمكن فقط بعثه (أو امتصاصه) بمقادير معينة. نستطيع أن نشبه ذلك بصنبور يقطر منه الماء. حقيقة أن الماء تسقط قطراته من الصنبور في شكل «تكتلات» بالغة الصغر لا تعني أن الماء في الخزان الذي يغذي الصنبور يوجد فقط في شكل قطرات منفصلة. في ١٩٠٥ كان ألبرت أينشتاين أول فرد في الأزمنة الحديثة يأخذ جديًّا فكرة أن الضوء يوجد بالفعل في شكل تكتلات صغيرة، جسيمات للضوء أصبحت تعرف بالفوتونات، وظل أينشتاين لما يقرب من السنوات العشر التالية وهو يشكل رأي أقلية هي أساسًا من فرد واحد.[٢] إلا أنه ثبت في النهاية أن سلوك الضوء في بعض التجارب يتوافق بالفعل مع تنبؤات نموذج الجسيم. ومن ثم فإن نموذج الجسيم لا بد أنه نموذج صالح أيضًا. لا توجد تجربة تبين أن الضوء يسلك في الوقت نفسه كموجة وكجسيم، ولكن الضوء يمكنه أن يتوافق مع تنبؤات أي من النموذجين حسب طبيعة التجربة.

[٢] طرح نيوتن نموذجًا مقبولًا لجسيم الضوء، إلا أن نموذج الموجة ساد بدلًا منه.

هذا أمر يستحق أن نجعله واضحًا، لأن فيه مثلًا ممتازًا للقيود على النماذج. ينبغي ألا يقول (أو يعتقد) أحد بأي حال إن الضوء «يكون» موجة، أو«يكون» جسيمًا. كل ما يمكننا قوله هو أن الضوء في الظروف الملائمة يسلك «وكأنه» موجة أو يسلك «وكأنه» جسيم، بما يماثل تمامًا أن الذرة في ظروف معينة تسلك «وكأنها» كرة صغيرة صلبة، في حين أنها في ظروف أخرى تسلك «وكأنها» مكونة من نواة بالغة الصغر تحيطها سحابة من الإلكترونات. ليس هناك أي تناقض أو تعارض في ذلك. القيود المحدَّدة أمر كامن في نماذجنا وفي تصورنا البشري، لأننا نحاول أن نصف شيئًا، هو ككل لا يشبه أي شيء مما نخبره بحواسنا. التشوش الذي نشعر به عندما نحاول تصور كيف أن الضوء يمكنه أن يكون معًا موجة وجسيمًا، هو جزء مما يسميه ريتشارد فينمان الفيزيائي الأمريكي بأنه «انعكاس لرغبة غير محكومة، وإن كانت متغطرسة، في أن نرى الأمر بلغة من شيء مألوف». الضوء هو بالفعل ظاهرة كمومية يمكن وصفها على نحو فعال للغاية بلغة من معادلات رياضية، ولكن لا توجد بشأنه أي صورة واحدة في حياتنا اليومية تعطينا فكرة عما يكونه. عالم الكم كله على هذا المنوال، وأول إسهام عظيم لنيلز بور في الفيزياء هو أنه دمج رياضيات فيزياء الكم في نموذج للذرة دون أن يصيبه ذلك بانزعاج بالغ حول ما إذا كان هذا النموذج له معنى معقول بلغة من الحياة اليومية.

مع بداية القرن العشرين عرف العلماء أن كل شيء على الأرض مصنوع من الذرات، وأن هناك نوعًا واحدًا من الذرة لكل من العناصر الكيمائية؛ ذرات الأكسجين، وذرات الذهب، وذرات الهيدروجين، وهلم جرًّا. وهم يعرفون أيضًا أن الذرات ليست غير قابلة للانقسام، كما كان يعتقد ذات يوم، وإنما هناك أجزاء منها تسمى الإلكترونات يمكن فصلها بعيدًا عنها في الظروف المناسبة. في ذلك الوقت كان النموذج المفضل للإلكترون يصفه على أنه جسيم بالغ الصغر، وقد بينت التجارب أن الإلكترونات تسلك بالفعل في الحقيقة وكأنها جسيمات بالغة الصغر. الأحجية التي حلها بور هي كيف أن الضوء يشَع (أو يمتص) بواسطة أنواع مختلفة من الذرات المفردة؛ وبالإضافة إلى ذلك، فإن نموذج بور يفسر الأحجية بمستوى فيه تفاصيل أكثر من دراسة

بلانك عن الضوء الذي تبعثه أشياء متوهجة مصنوعة من أنواع ذرات كثيرة مختلفة. عندما يُسخن عنصر نقي (مثل الصوديوم) في لهب، فإنه يصدر إشعاعًا عند طول موجات أو ألوان محددة بدقة، وينتج عن هذا نمط من الخطوط في طيف الضوء المرئي، الذي يشمل كل ألوان قوس قزح (الحقيقة أن قوس قزح «هو بالفعل» طيف). في حالة الصوديوم تكون الخطوط في الجزء البرتقالي الأصفر من قوس قزح؛ على أن كل عنصر (بما يعني كل نوع من الذرة) ينتج نمطه الخاص المميز من الخطوط، وهو نمط فريد مثل بصمة الإصبع ويشبه شفرة الخطوط العمودية المطبوعة على السلع. مزيج الألوان الذي نراه في قوس قزح هو نتيجة أنواع كثيرة مختلفة من الذرات كلها تصدر إشعاعًا عند أطوال موجات مختلفة. ينتهي هذا المزج عادة بأن يعطي مظهر اللون الأبيض، ولكن الألوان تنفصل بالطريقة التي ينحني بها الضوء من خلال قطرات المطر، أو كما بينت أبحاث إسحاق نيوتن تنفصل الألوان باستخدام منشور ثلاثي من الزجاج.

والآن، فإن الضوء شكل من الطاقة، وطاقة الضوء التي تبعثها الذرات لا بد أن تأتي من داخل الذرات (من أكثر القوانين تأسسًا في الفيزياء أن الطاقة لا يمكن تخليقها من لا شيء، وإن كانت هذه القاعدة نفسها لها قيود تحددها كما سنرى فيما بعد). أدرك بور أن الطاقة تأتي من إعادة تنظيم الإلكترونات في الجزء الخارجي من الذرة. (ومن ثم فإن الضوء هو بالمعنى الحرفي طاقة ذرية، كذلك فإن ما أصبح يعرف خلال منعطف من التاريخ كطاقة ذرية، ينبغي حقًّا أن يسمى بأنه طاقة نووية). تحمل الإلكترونات شحنة سالبة، بينما تحمل نواة الذرة شحنة موجبة، وهكذا فإن الإلكترونات تنجذب إلى النواة بطريقة تماثل أن جرمًا فوق الأرض ينجذب بواسطة الجاذبية للأرض نفسها. عندما نحمل ثقلًا ونحن نصعد سلمًا، يكون علينا أن نعمل شغلًا (أي نُدخل طاقة) لنحرك الثقل مسافةً تبتعد أكثر من مركز الأرض. عندما نسقط ثقلًا من نافذة بأعلى، تنطلق هذه الطاقة، وتتحول أولًا إلى طاقة حركة الثقل الساقط، ثم بعدها عندما يصطدم الثقل بالأرض، تتحول الطاقة إلى حرارة، وتسخّن الأرض قليلًا، إذ تجعل الذرات والجزيئات عند موضع الارتطام تهتز فيما حولها. طرح

بور أنه بمثل هذه الطريقة، إذا تحرك إلكترون في الجزء الخارجي من إحدى الذرات ليقترب أكثر من النواة، فإن الطاقة ستنطلق (كضوء في هذه الحالة). إذا كان هناك إلكترون قريب من النواة وامتص طاقة (ربما تكون من الضوء، أو لأن الذرة قد سُخنت) فإنه سيثب بعيدًا إلى الخارج. ولكن لماذا ينبغي عندما تنبعث الطاقة أو تمتص أن يكون ذلك فحسب عند أطوال موجات محددة بدقة، تقابل مقادير طاقة محددة بدقة؟

في النموذج الذي أنشأه بور يتم تصور الإلكترون على أنه يتحرك حول النواة بطريقة تذكر بطريقة دوران الكواكب حول الشمس. إلا أنه في حين أن أحد الكواكب يستطيع من حيث المبدأ أن يدور في مدار حول الشمس على أي مسافة بعد منها، فإنه حسب بور «يُسمح» فقط بوجود مدارات معينة للإلكترونات، بما يبدو وكأن أحد الكواكب يستطيع فقط أن يشغل مدار الأرض أو مدار المريخ، ولا يستطيع أن يشغل مدارًا في أي مكان فيما بينهما. ثم طرح بور أن الإلكترون يمكن أن يثب من أحد المدارات إلى الآخر (وكأن المريخ قد وثب إلى مدار الأرض) ويبعث في هذه العملية مقدارًا محددًا بدقة من الطاقة (يقابل طول موجة ضوء محدد بدقة). ولكن الإلكترون لا يستطيع أن يثب إلى مدار بيني فيما بين المدارات الأصلية، ليبث مقدار طاقة بينية، لأنه ليس هناك وجود لمدارات بينية. وفر بور بالطبع الرياضيات اللازمة لدعم ما طرحه، وقد تأسست على دراسات الأطياف، وطُورت الفيزياء اللازمة بواسطة المزيد من التجارب والملاحظات. على أن المهم هنا هو أن بور عثر على نموذج يستطيع أن يتنبأ بالمكان الذي ينبغي أن توجد فيه الخطوط في أطياف الذرات، حتى وإن كانت فكرة ما أصبح يعرف بأنه المدارات «المكمّاة»[٣] Quantized هي فكرة لا معنى لها بلغة من خبرة حياتنا اليومية. يساوي ذلك في إثارة الحيرة، أنه حسب هذا النموذج تحدث التغيرات وكأن أحد الإلكترونات يختفي من أحد المدارات ليظهر في التو في مدار آخر دون أن يجتاز بأي حال المسافة فيما بينهما. على الرغم من أن العلماء استغرقوا زمنًا طويلًا لاستيعاب

[٣] المكماة أي المحسوبة بقوانين ميكانيكا الكم. (المترجم)

هذه النقطة، فإن بور قد أوضح أنه لا يلزم لأي نموذج أن يكون معقولًا حتى يكون نموذجًا صالحًا؛ كل ما يكون عليه أن يؤديه هو أن يصنع تنبؤات (تتأسس على رياضيات سليمة وفيزياء تلاحظ) تتوافق مع نتائج التجارب.

كثيرًا ما يعتبر الآن أن نموذج بور عن الذرة يكاد يكون عتيقًا ومن طراز قديم. تغيرت نظرة الفيزيائيين الآن للإلكترون تغيرًا كبيرًا، على الأقل منذ أن اكتُشف في عشرينيات القرن العشرين أن الإلكترون في بعض الظروف التجريبية يسلك وكأنه إحدى الموجات. هناك ثنائية من الموجة–الجسيم بشأن الإلكترون تمامًا مثل الضوء (بل في الحقيقة مثل أي كيان آخر في عالم الكمومية). لا يمكننا القول إن الإلكترون «هو» موجة، أو «هو» جسيم، يمكننا فقط أن نقول إنه أحيانًا (بطريقة يمكن التنبؤ بها) يسلك وكأنه موجة، وأحيانًا يسلك كأنه جسيم. أدى هذا الاكتشاف إلى فكرة أن الإلكترونات في الذرة تشغل سحابة غائمة منتشرة حول النواة؛ تحدث تغيرات في طاقة السحابة بطرائق أكثر رهافة من أن تكون عن طريق جسيم بالغ الصغر يتواثب من أحد المدارات إلى الآخر. هذا نموذج أكثر تعقدًا، ينجح تمامًا عندما نريد أن نفسر كيف تنضم الذرات معًا لتصنع جزيئات وهو بذلك نموذج يشكل الأساس لكل فهمنا الحديث للكيمياء. ولكن كما أن نموذج نيوتن هو كل ما نحتاج إلى معرفته عن الجاذبية عندما نحسب مسار قذف لمسبار فضاء يذهب إلى القمر، فإنه بمثل ذلك تمامًا يظل نموذج بور ناجحًا إذا كان كل ما نريد أن نفعله هو أن نفسر الخطوط التي نراها في أطياف المواد الساخنة، مثل الصوديوم (أو الشمس). نماذجنا نادرًا ما تموت، الأمر فحسب أن مدى فائدتها مقيد.

هذا هو كل ما علينا أن نقوله الآن بشأن الإلكترونات، لأن الإلكترون في النموذج المعياري يعتبر أحد اللبنات الأساسية لبناء المادة؛ كيان أولي حقًّا لا يُصنع من أشياء أصغر. إلا أن هذا لا يصدق على النواة. النموذج المعياري كما أنه «يشرح» ما تكونه النواة — أي يوفر لنا نموذجًا عمليًّا لوصفها — فإنه يطرح أيضًا تبصرًا نافذًا بشأن القوى التي تعمل فيما بين أنواع الكيانات الأولية التي تعودنا أن نفكر فيها كجسيمات.

من الصعب أن نتجنب استخدام مصطلح «الجسيم»، على الأقل لبعض الوقت، عندما نتحدث عن كيانات أولية مثل الإلكترونات، ولن يحدث دائمًا أن نحدد وصفًا لها. ولكن من المهم أن نتذكر أن استخدامنا لهذه الكلمة لا يعني أن هذه الكيانات ينبغي أن نفكر فيها على أنها فحسب كرات صغيرة صلبة أو تركيزات من الكتلة والطاقة عند نقطة ما. فهي وإن كانت تسلك على هذا النحو في بعض التجارب، إلا أنها لا تفعل ذلك في تجارب أخرى. يستخدم أحيانًا مصطلح «جسيموجة» Wavicle لمحاولة توصيل الوصف المميز لطبيعة الموجة–الجسيم المزدوجة للأشياء الكمومية، إلا أنني غير مقتنع بأن هذا أمر ناجح. ومن الجانب الآخر فإن الفيزيائيين لديهم بالفعل بديل لكلمة «القوة» هو بديل صالح تمامًا، كما أنه صالح أيضًا من حيث إن «القوى» الكمومية تعد غريبة عن مصطلحات الحياة اليومية بمثل غرابة «الجسيمات» الكمومية.

نحن جميعًا على دراية بقوتين من قوى الطبيعة هما الجاذبية والكهرومغناطيسية. نحن نشعر بأن الأرض تشدّنا إلى أسفل، كما أننا نرى أحد المغناطيسات وهو يلتقط جسمًا معدنيًّا، أو أننا نشحن مشطًا بلاستيكيًّا بأن نمرره خلال شعرنا ثم نستخدم الكهرباء الاستاتيكية التي تولدت فيه لالتقاط قطع ورق بالغة الصغر. على أنه كما تبين هذه الأمثلة فإن القوى تعمل دائمًا بين جسمين اثنين (أو أكثر)، فالأرض تشدنا لأسفل، والمغناطيس يلتقط مسمارًا. هناك تفاعل بين الأجسام المشاركة في الأمر، وهذا يعطي للفيزيائيين مصطلحهم المفضل «التفاعل المتبادل» Interaction، لوصف ما يجري. قد يبدو من الأمثلة التي أعطيناها أن هناك ثلاثة تفاعلات تمارس في الحياة اليومية، وذلك لأن المغناطيسية والكهرباء لهما ظاهريًّا خصائص مختلفة. إلا أنه حدث في القرن التاسع عشر أن اكتشف الفيزيائي الاسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل، على أساس أبحاث مايكل فارادي اللندني؛ مجموعة من المعادلات تصف الكهرباء والمغناطيسية معًا داخل إطار نموذج واحد. فهما في الواقع وجهان مختلفان لنفس التفاعل، مثل وجهين اثنين لقطعة عملة واحدة.

على أن هناك اختلافات عديدة حقيقية ومهمة بين التفاعل الجذبوي والتفاعل الكهرومغناطيسي. الجاذبية أضعف بكثير جدًّا جدًّا من

الكهرومغناطيسية. يتطلب الأمر مثلًا شدًّا من الأرض بأسرها للإبقاء على دبوس من الصلب لأسفل فوق الأرض، ولكن مغناطيسًا في لعبة طفل يستطيع بسهولة أن يتغلب على هذا الشد ويرفع الدبوس إلى أعلى. حيث إن الإلكترونات ونوى الذرات تحمل شحنة كهربائية، وحيث إن قوة الشد الجذبوي من إحدى الذرات على الأخرى هي بقدر ضئيل جدًّا إلى حد يمكن تجاهله، فلهذا كله نجد أن التفاعلات المهمة بين الذرات تكون كلها كهرومغناطيسية. ومن ثم فإن القوى الكهرومغناطيسية تجعل جسمنا يتماسك معًا وهي التي تجعل عضلاتنا تعمل. عندما تلتقط تفاحة من فوق مائدة يعني ذلك أن التفاعلات الكهرومغناطيسية في عضلاتك تتغلب على التفاعل الجذبوي بين التفاحة والأرض. وهكذا فإنك بأحد المعاني الحقيقية أكثر قوة من الكوكب، بفضل من التفاعلات الكهرومغناطيسية.

على الرغم من أن الجاذبية ضعيفة، فإنها تعمل على مدى مسافة طويلة جدًّا. التفاعل بين الشمس والكواكب يُبقى الكواكب في مداراتها، والشمس بطريقة مماثلة هي نفسها جزء من منظومة من مئات المليارات العديدة من نجوم تشكل مجرة في شكل قرص يبلغ عرضه تقريبًا مائة ألف سنة ضوئية، يدور حول مركزه ويتماسك معًا بواسطة الجاذبية. التفاعلات الكهرومغناطيسية، من حيث المبدأ، لها المدى الطويل نفسه لفعلها. إلا أن هناك اختلافًا آخر بين هذه التفاعلات والجاذبية، وهو أنها تأتي في أنواع مختلفة يلغي أحدها الآخر. الشحنة الموجبة في نواة إحدى الذرات تلغيها الشحنة السالبة للإلكترونات، ومن ثم فإنه يبدو من أي مسافة كبيرة — كبيرة بالمقارنة بحجم الذرة — أن الذرة متعادلة كهربائيًّا، بدون أي شحنة عامة. وبمثل ذلك الأقطاب المغناطيسية الشمالية تكون دائمًا مصحوبة بأقطاب مغناطيسية جنوبية، وعلى الرغم من أن المجالات المغناطيسية للأجرام مثل الشمس والأرض تمتد فعلًا في الفضاء إلى حد ما، فإننا نجد بالمقاييس الكونية أنه لا يوجد تأثير مغناطيسي عام يشد الأشياء معًا أو يدفعها متباعدة.

هناك شيء آخر يميز الكهرومغناطيسية عن الجاذبية. الجاذبية دائمًا تشد. إلا أنه على الرغم من أن الشحنات الكهربائية المتضادة تتجاذب

وكذلك أيضًا الأقطاب المغناطيسية المتضادة، فإن الشحنات المتماثلة هي والأقطاب المتماثلة يتنافر أحدها مع الآخر، وهذا أمر اكتشفناه جميعًا ونحن أطفال عندما كنا نحاول أن نحشر معًا القطبين الشماليين لمغناطيسين مختلفين. وهكذا فإن الفيزيائيين حتى قبل أن يحاولوا إجراء أبحاث عن عالم الكمومية، كانوا يعرفون أن التفاعلات (أو القوى) يمكن أن يكون مدى فعلها طويلًا أو قصيرًا، وأنها يمكن أن تكون مصحوبة بأنواع مختلفة من «الشحنة»، وأنها يمكنها أن تتجاذب أو تتنافر. وفيما هو أكثر رهافة، فإننا نرى أن التفاعلات لا تؤثر كلها بالطريقة نفسها في كل شيء. الجاذبية كما يبدو شاملة في تأثيرها، وتؤثر فعلًا في كل شيء. أما تأثيرات الكهرباء والمغناطيسية فلها فعلها في أنواع معينة فحسب من الأشياء. أصبح لهذا كله فائدته عندما أخذ الفيزيائيون يسبرون ما في داخل النواة.

الطريقة التي يسبر بها الفيزيائيون داخل النواة هي أن يطلقوا حزمًا من الجسيمات — وهذا مصطلح يستخدم لعدم وجود مصطلح أفضل — فيطلقون هذه الحزم على النوى وعلى الجسيمات تحت النووية، ويقيسون الطريقة التي تتواثب بها متباعدة. كلما زادت الطاقة الموجودة في الجسيمات الآتية للداخل، زادت دقة التفاصيل التي يمكن تحديدها في «الهدف». كان هذا يتم أولًا في فترة مبكرة من القرن العشرين باستخدام جسيمات تنتج طبيعيًّا من عمليات النشاط الإشعاعي. مع تنامي التكنولوجيا صُقل هذا التكنيك بأخذ جسيمات مثل الإلكترونات وعُجِّل بها إلى طاقات مرتفعة جدًّا، باستخدام مجالات مغناطيسية في ماكينات سميت تسمية منطقية للغاية بمعجلات الجسيمات. أدى هذا بدوره إلى إنشاء معجلات هائلة مثل معجل «سيرن» (المنظمة الأوروبية للأبحاث النووية) بالقرب من جنيف، حيث تستمر إلى الآن أبحاث الطليعة عن طبيعة المادة والتفاعلات (أو «قوى الطبيعة»).

اكتُشفت النواة نفسها في تجارب أجريت في كمبردج عند بداية عشرينات القرن العشرين، وبعدها أدت الخطوة التالية في عشرينيات القرن إلى اكتشاف أن النواة تستجيب لهذا السبر وكأنها كرة قد صنعت من نوعين من الجسيمات، البروتونات والنيوترونات التي تلتصق معًا مثل عناقيد عنب أوثق حزمها.

نواة أبسط ذرة، أي الهيدروجين، تتكون بالفعل من بروتون واحد، ولكن النوى الأخرى كلها تحوي نيوترونات مثلما تحوي بروتونات، اليورانيوم مثلًا في شكله الأكثر شيوعًا يحوي ٩٢ بروتونًا و١٤٦ نيوترونًا. كل بروتون فيه مقدار من الشحنة الموجبة يساوي مقدار الشحنة السالبة على إلكترون واحد، ومن ثم فإن الذرات المتعادلة يكون عدد البروتونات فيها مماثلًا بالضبط لعدد الإلكترونات. كل نيوترون، كما يدل اسمه، متعادل كهربائيًّا. ظهر حينها سؤال واضح، ما السبب في أن التنافر بالتفاعل بين كل البروتونات الموجبة الشحنة لا يؤدي إلى تفجر النواة لتتفكك؟ الإجابة الواضحة، التي أبدتها التجارب فيما بعد، هي أنه لا بد من وجود تفاعل بالجذب، لم يسبق أن تبادر للذهن، يتغلب على التنافر الكهربائي ويبقي على النواة متماسكة معًا. هذا التفاعل أقوى من التفاعل الكهرومغناطيسي، ولهذا فقد أصبح معروفًا بأنه التفاعل القوي (أو القوة القوية). لا يمكن اكتشاف أي أثر من تأثيرات هذا التفاعل عند مسافة بعيدة عن النواة، ولهذا فقد كان من الواضح أنه ولا بد له مدى فعل لمسافة قصيرة، بحيث يمتد تأثيره فحسب عبر قطر نواة كبيرة. وهذا هو السبب في أنه لا توجد نواة أكبر كثيرًا من نواة اليورانيوم. إذا أردنا مثلًا يصور ذلك، دعنا نتخيل محاولة لأن نلصق معًا ما يزيد عن حوالي ٢٤٠ بروتونًا ونيوترونًا: سنجد أن البروتونات على الجانبين المتقابلين للكرة ستظل تتنافر بقوة أحدها عن الآخر بواسطة التفاعل الكهرومغناطيسي، ولكنها ستكون منفصلة بمسافة أكبر من أن تشعر بقوة جذب التفاعل القوي.

الطاقات اللازمة للسبر داخل البروتونات والنيوترونات (التي تسمى معًا بالنيوكليونات Nucleons هي طاقات كبيرة كبرًا بالغًا حتى إنها استغرقت عقودًا — من ثلاثينيات إلى ستينيات القرن العشرين — لينشأ نموذج موثوق به عما يجري داخل هذه الجسيمات. انبثقت هكذا صورة تتسق مع نموذج يتألف فيه كل واحد من النيوكليونات من ثلاثة كيانات أولية حقًّا (أولية مثل الإلكترونات) سميت بالكواركات، أدت تجارب سبر البروتونات والنيوترونات إلى دعم تنبؤات بنموذج يوجد فيه نوعان من الكواركات، سميا باسمي «علوي» و«سفلي». يُعد البروتون مكونًا من كواركين علويين وكوارك

سفلي، في حين أن النيوترون مكون من كواركين اثنين سفليين وواحد علوي. كل كوارك سفلي له شحنة قدرها ٣/١ شحنة الإلكترون، بينما كل كوارك علوي له شحنة قدرها ٣/٢ شحنة البروتون، ويؤدي حاصل جمع الأرقام إلى تفسير ما يلاحظ من شحنات للبروتونات والنيوترونات.

ولكن ما هو السبب في أنه لم يتم قط الكشف عن كواركات فردية، أو أي جسيمات لها شحنة من كسور؟ يفسر النموذج هذا الأمر (وتدعم التجارب هذا التفسير) بأن يطرح أن أزواج أو ثلاثيات الكواركات «محبوسة» داخل جسيمات مركبة مثل البروتونات والنيوترونات، بواسطة تفاعل يغدو أكثر قوة كلما كانت الكواركات متباعدة على مسافة أكبر. الجاذبية والكهرومغناطيسية تغدو كل منهما أكثر ضعفًا عند المسافات الأكثر بعدًا، إلا أننا جميعًا على دراية بنوع من قوة تزداد شدتها على المسافات الأبعد. عندما تمط رباطًا مطاطيًّا «أستك» عاديًّا سيقاوم جهودك كلما أخذت تمطه بقوة أكبر وأكبر، حتى نقطة معينة يُقطع عندها الرباط. الكواركات تسلك وكأنها ممسوكة لجيرانها المباشرين بأربطة من أساتك لينة وهي تتحرك سريعًا منسابة فيما حولها داخل النواة، ولكنها تُشد للعودة بحدة عندما يتحرك بعيدًا أحدها عن الآخر. يمكننا حتى أن نمضي بالتشبيه لنصل إلى تقطع أربطة الأستك. إذا وجُهت طاقة كافية لتحريك أحد الكواركات — كأن يحدث مثلًا أن يرتطم به جسيم يتحرك سريعًا آتيًا من الخارج في تجربة لأحد المعجلات — فإن الروابط المتبادلة مع الجيران ستنكسر بالفعل. على أنه حسب معادلة أينشتاين المشهورة أن الطاقة = الكتلة × مربع السرعة (ط = ك س٢ أو $E = mc^2$) فإن هذا يحدث فقط إن كان هناك طاقة فائضة (E) تكفي لصنع كواركين جديدين (كتلة كل منهما هي m). تذهب كل الطاقة الإضافية في صنع هذين الكواركين الجديدين، على جانبي عملية الكسر، لهذا لا يمكننا أن نكتشف أي كوارك منفصل.

هذا عمل يعني صنع الجسيمات من طاقة خالصة (أو إذا شئت فإن المعادلة هنا هي الكتلة = الطاقة/مربع السرعة أو $m = E/C^2$) بدلًا من أن تكون $E = mc^2$، وهذا في حد ذاته له أهمية حاسمة في فهمنا للعالم تحت الذري. ما يحدث في أجهزة تصادم الجسيمات أن حزمًا من

جسيمات مفعمة بالطاقة تصطدم اصطدامًا مباشرًا إحداها بالأخرى أو تصطدم بأهداف ساكنة. عندما يحدث ذلك، ينتج عنه أن تنتهي الجسيمات السريعة الحركة إلى التوقف، وتنطلق طاقة الحركة التي وضعت داخل الجسيمات في شكل وابل من جسيمات جديدة. هذه «ليست» جسيمات كانت موجودة بأي معنى «داخل» الجسيمات الأصلية وتم خروجها مندفعة نتيجة الاصطدام، وإنما هي جسيمات جديدة صنعت بالمعنى الحرفي من طاقة خالصة. معظم الجسيمات التي تصنع بهذه الطريقة تكون غير مستقرة وتتحلل إلى جسيمات أقل كتلة، وتصل في آخر الأمر إلى الجسيمات المعتادة من البروتونات والنيوترونات، والإلكترونات. إلا أن الطريقة التي تتحلل بها الجسيمات توفر لنا المفاتيح لحل ألغاز بنيانها الخاص الداخلي، وقد أدى هذا إلى تحسين النموذج المعياري.

الخطوة الأولى هي العثور على نموذج يصف التفاعل «القوي». إن التفاعل الذي يحبس الكواركات داخل النيوكليونات يُعد التفاعل القوي الحقيقي، القوة ما بين النيوكليونات، في حين أن التفاعل القوي الأصلي يُرى كأثر ضعيف لهذا التفاعل القوي الحقيقي، يتسرب للخارج من النيوكليونات ليؤثر في جيرانها. ما إن أصبح الدليل الداعم لنموذج الكوارك دليلًا مقنعًا، حتى تمكن الفيزيائيون بسرعة من التوصل إلى نموذج للتفاعل القوي الذي يعمل بين الكواركات وذلك لأنهم في وقت سابق في أربعينيات القرن العشرين كانوا قد أنشئوا نموذجًا دقيقًا إلى حد رائع للطريقة التي تؤثر بها الجسيمات المشحونة كهربائيًّا كالإلكترونات والبروتونات أحدها في الآخر من خلال التفاعل الكهرومغناطيسي.

تأسس هذا النموذج على فكرة المجال، وهي فكرة مألوفة في سياق المجال المغناطيسي، تأثير ينتشر خلال الفضاء من مصدر ما. في حالة المجال المغناطيسي نستطيع حتى أن نعطي صورة بصرية عما يجري بأن نضع قضيبًا مغناطيسيًّا تحت صفحة ورق، وننثر برادة حديد فوق الورقة، ونطرق الورقة برفق لنجعل البرادة ترتب نفسها في أنماط منحنية تتبع «خطوط القوة» في المجال المغناطيسي. نظرية المجال الحديثة تدمج أفكارًا من الفيزياء الكمومية، وهي لهذا السبب تسمى نظرية المجال الكمومية. هناك

جزء خاص من الفيزياء الكمومية يدخل في نظرية التفاعل الكهرومغناطيسي، وهو أن الضوء — و«الضوء» هنا لا يعني فحسب الضوء المرئي وإنما يعني أي شكل من الإشعاع الكهرومغناطيسي، بما في ذلك موجات الراديو، وأشعة إكس، وما إلى ذلك — هذا الضوء يأتي في شكل كمات تسمى الفوتونات. الفوتونات بلغة الفيزياء الكمومية تسمى كمات المجال وتعد أجزاء من المجال تمت «استثارتها» بمُدخل من الطاقة.

في ثلاثينيات القرن العشرين أنشأ الفيزيائيون فكرة أن التفاعلات الكهرومغناطيسية يمكن وصفها بلغة من تبادل الفوتونات بين الجسيمات المشحونة. النسخة المبكرة من هذا النموذج صنعت تنبؤات عن سلوك الجسيمات المشحونة التي تكون قريبة الصلة بالخصائص التي تلاحظ في التجارب ولكنها لا تتوافق تمامًا مع قياسات ما يجري في التفاعلات بين الجسيمات المشحونة. على أنه في أربعينيات القرن العشرين، تم حل هذه التناقضات، وانبثقت النظرية الحديثة للكهروديناميات الكمومية بأن أدخل على المسرح أحد أغرب الجوانب في عالم الكمومية، وهو عدم اليقين.

عدم اليقين الكمومي هو في الواقع أمر منضبط ودقيق دقة بالغة. أنشأ هذه الفكرة ورنر هايزنبرج الفيزيائي الألماني في أواخر عشرينيات القرن العشرين، وذلك في البداية بلغة من خصيصتين مألوفتين للجسيمات: موضع الجسيمات وكمية حركتها، وهي قياس لاتجاه وسرعة حركتها. تعودنا في حياتنا اليومية على فكرة أننا نستطيع من حيث المبدأ أن نقيس معًا في الوقت نفسه موضع وكمية حركة أحد الأجسام (مثل كرة البلياردو النموذجية). نحن نعرف أين يكون الجسم وكذلك أيضًا نعرف في «الوقت نفسه» إلى أين يذهب. أدرك هايزنبرج أن الكيانات الكمومية مثل الإلكترونات والفوتونات لا تسلك هكذا، وهذا أمر يصبح واضحًا بالنظر للوراء بشأن ثنائية الموجة والجسيم. الموضع خاصية نمطية للجسيم، أما الموجات فليس لها موضع دقيق في الفضاء. إذا كان لأحد الكيانات الكمومية وجهان في طبيعته (أو أنه يسلك وكأن له وجهين) هما وجها الجسيم والموجة معًا، فلن يكون مما يفاجئنا أن نجد أنه لا يمكن أبدًا تحديد موضعه بدقة عند إحدى النقاط.

وجد هايزنبرج أن مقدار عدم اليقين في موضع كيان كمومي (عدم اليقين بالنسبة لأين يكون مكانه) له علاقة بمقدار عدم اليقين في حركته

(عدم اليقين بالنسبة لأين يذهب)، وهذه العلاقة هي بحيث كلما زادت الدقة التي يتحدد بها الموضع كان اليقين أقل حول كمية الحركة، والعكس بالعكس. هذان الوجهان اللايقينيان يرتبطان رياضيًّا بمعادلة تعرف الآن بعلاقة عدم اليقين لهايزنبرج. النقطة الحاسمة التي تؤخذ بعين الاعتبار هي أن عدم اليقين هذا ليس نتيجة لتخبط بشري أو قصور في التجارب التي نصممها لقياس أشياء مثل الإلكترونات. وإنما عدم اليقين هذا متأصل داخليًّا في طبيعة العالم الكمومي. الإلكترون ليس له بالمعنى الحرفي موضع دقيق وكمية حركة دقيقة. الإلكترون المحبوس داخل الذرة مثلًا يكون له موضع في الفضاء محدد بدقة إلى حد ما، ولكن كمية حركته تتغير باستمرار وهو يتحرك هنا وهناك في السحابة الإلكترونية للذرة. الإلكترون الذي يتحرك خلال الفضاء كموجة قد تكون له كمية حركة لها دقة بالغة، ولكنه لا يوجد عند نقطة ما في أي مكان على طول الموجة.

هذا كله مهما كان غريبًا فإنه ليس بنهاية القصة. سنجد أن النوع نفسه من اللايقين الكمومي موجود أيضًا في ثنائيات أخرى من الخواص في العالم الكمومي، إحدى هذه الثنائيات هي الطاقة والوقت. إذا جمعنا معًا علاقة عدم اليقين عند هايزنبرج ونظرية أينشتاين عن النسبية الخاصة (التي تدور حول المكان والزمان) فإن هذا يخبرنا بأنك إذا أخذت حجمًا معينًا مما يبدو أنه فضاء خاوٍ وتابعناه لزمن معين، فلن تستطيع أن تكون متأكدًا من مقدار ما يحويه من طاقة. ليس الأمر أنك «أنت» وحدك الذي لا تستطيع أن تكون متأكدًا، الأمر هو كما في حالة الموضع وكمية الحركة، حيث الطبيعة نفسها لا تعرف ذلك. إذا تابعت الأمر عبر فترة طويلة من الزمن، تستطيع أن تكون متأكدًا من أن الفضاء خاوٍ (أو هو تقريبًا خاوٍ). على أنه كلما كانت فترة زمن المتابعة أقصر، ستقل قدرتك على التأكد من مقدار الطاقة داخل ذلك الحجم. ستجد في الفترة القصيرة زمنيًّا القصر الكافي، أن الطاقة تستطيع أن تملأ هذا الحجم، بشرط أن تختفي مرة أخرى خلال الوقت المحدد الذي يتعين حسب علاقة عدم اليقين.

من الممكن أن تتخذ هذه الطاقة شكل فوتونات، تظهر للوجود من لاشيء على الإطلاق، وسرعان ما تختفي ثانية. بل إنها يمكن حتى أن تتخذ

شكل جسيمات كالإلكترونات، بشرط أنها لا تستمر في الوجود إلا للومضة الزمنية البالغة الصغر التي تسمح بها علاقة عدم اليقين. هذه الكائنات ذات الحياة القصيرة تعرف بالجسيمات «التقديرية» (أو الافتراضية)، وتسمى العملية كلها بـ«تراوح الفراغ». الفضاء الخاوي، أو الفراغ، ينظر إليه في هذا النموذج على أنه يرغي ويزبد مضطربًا بالنشاط بالمقياس الكمومي. وعلى وجه الخصوص فإن جسيمًا مشحونًا كالإلكترون يكون غارقًا في بحر من الجسيمات التقديرية والفوتونات، وهذه الجسيمات حتى وهي في زمن حياتها القصير تتفاعل مع الإلكترون. عندما اتُّخذت الكهروديناميكا الكمومية (QED) لتفسير وجود هذا البحر من الجسيمات التقديرية، فإنها أعطت تنبؤات توافقت بدقة مع خصائص الجسيمات المشحونة التي قيست في التجارب. الحقيقة هي أن التجارب والنموذج يتوافقان بدرجة من الدقة تصل إلى جزء واحد من عشرة مليارات، أو بنسبة ٠٫٠٠٠٠٠٠٠١ في المائة. السبب الوحيد في أن درجة الدقة ليست حتى أفضل من ذلك هو أنه لم تصمم بعد تجارب تصلح لاختبار النموذج بدرجة تكون أكثر دقة. على أن هذا فيه أقصى درجة من دقة الاتفاق بين النظرية والتجربة بالنسبة لأي نموذج علمي تم اختباره فوق الأرض، بل حتى قانون نيوتن للجاذبية لم يصل اختباره إلى هذه الدرجة من الدقة. الكهروديناميكا الكمومية هي بهذا المقياس أنجح نموذج في العلم كله. وهذا التوافق الدقيق يكون صالحًا فحسب بهذه الدرجة عندما يشمل تأثيرات عدم اليقين الكمومي — أي الفراغ المزبد والجسيمات التقديرية. النموذج بأكمله يجتاز الاختبار.

لا يكاد يدهشنا أنه عندما أراد الفيزيائيون إنشاء نموذج للتفاعل المتبادل بين الكواركات — التفاعل القوي — فإنهم اتخذوا الكهروديناميكية الكمومية كقالب صب وحاولوا التوصل إلى نظرية مجال كمومي مشابهة. في هذا النموذج، كمات المجال المسئولة عن نقل التفاعل القوي تسمى الجلونات Gluons أو الغرويات، لأنها تلصق الكواركات معًا مثل الغراء. وكما أن الفوتونات تصاحب الشحنة الكهربائية، فبمثل ذلك تمامًا تصاحب الجلونات نوعًا آخر من الشحنة، تسمى اللون، وإن لم تكن لها علاقة بالألوان بمعنى الكلمة في الحياة اليومية. بينما تأتي الشحنات الكهربائية في نوعين فقط

موجب وسالب، نجد أن شحنة اللون تأتي في ثلاثة أنواع، «أحمر» و«أزرق» و«أخضر». حتى نجعل نموذج التفاعل القوي ناجحًا، نحتاج إلى ثمانية أنواع مختلفة من كمات المجال، في حين أننا في حالة الكهرومغناطيسية نحتاج فقط إلى نوع واحد، هو الفوتون. وبالإضافة لذلك فإن الجلونات بخلاف الفوتون لها كتلة.

نموذج التفاعل القوي المؤسس على الكهروديناميكا الكمومية يسمى الدنياميكا اللونية الكمومية (quantum chromo dynamics = QCD)، وذلك لأنه يستخدم بهذه الطريقة أسماء الألوان. هناك صعوبات تنشأ عن العدد الكبير من أنواع كمات المجال وعن حقيقة أنها لها كتلة، ولهذا فإن الديناميكا اللونية الكمومية لا تصنع تنبؤات تتوافق مع نتائج التجارب بنفس الدرجة الدقيقة مثل ما يحدث مع الكهروديناميكا الكمومية، وفي هذا إشارة إلى أن النموذج المعياري ليس بالكلمة الأخيرة في الفيزياء. ولكنه أفضل نموذج لدينا عما يدور داخل أشياء مثل البروتونات والنيوترونات.

كمات المجال مثل الفوتونات والجلونات تسمى معًا بوزونات (تخليدًا لاسم الفيزيائي الهندي سا تندرا بوز)، بينما أنواع الكيانات التي تعودنا أن نفكر فيها كجسيمات، مثل الإلكترونات والكواركات، تعرف بأنها فيرميونات (على اسم الفيزيائي الإيطالي إنريكو فيرمي). وكما أن البوزونات يمكن التفكير فيها باعتبارها كمات مجال، فبمثل ذلك تمامًا يمكن أن نعتبر أن الفرميونات كمات مصاحبة «لمجالات مادة» تملأ كل الفضاء، بما يزيد معه عدم الوضوح في التمييز بين «الجسيمات» و«القوى». إلا أن هناك «فعلًا» اختلافات. الاختلاف الرئيسي بين العائلتين هو أن البوزونات يمكن أن تتخلق من طاقة خالصة بلا حدود — في كل وقت تضيء فيه أحد الأنوار، تتدفق داخل الغرفة مليارات ومليارات الفوتونات التي تخلقت جديدة. إلا أن العدد الكلي للفرميونات في الكون قد بقي العدد نفسه، بقدر ما نعرف، منذ الانفجار الكبير. الطريقة الوحيدة التي نستطيع أن نخلق بها من الطاقة فرميونًا جديدًا، مثل أحد الإلكترونات، هي أن نصنع في الوقت نفسه جسيمًا مضادًا كصورة المرآة (هو في هذه الحالة بعينها البوزيترون). الجسيم صورة المرآة هذا له خواص كمومية مضادة

(بما يشمل في هذه الحالة وجود شحنة كهربائية موجبة بدلًا من الشحنة الكهربائية السالبة)، ومن ثم فإن كلا الفرميونين الاثنين يلغي أحدهما الآخر من حيث إحصاء عدد الفرميونات، ذلك أن أحدهما سالب والآخر موجب وحاصل جمعهما يكون لا شيء. لدينا فيما بعد المزيد مما سنقوله عن المادة المضادة.

حتى الآن قد عيّنا ثلاثة فرميونات مختلفة — الإلكترون، والكوارك العلوي، والكوارك السفلي. قد عينا كذلك ثلاثة أنواع مختلفة من التفاعلات — الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والتفاعل القوي. إلا أنه لا يزال هناك فرميون واحد آخر وتفاعل واحد آخر نضيفه للقائمة. هذه الإضافة إلى النموذج المعياري أمر مطلوب لتفسير ظاهرة لوحظت لأول مرة في القرن التاسع عشر إلا أنها لم توصف وصفًا رياضيًّا مُرضيًا إلا في ستينيات القرن العشرين. وهي تسمى اضمحلال بيتا، وتشمل عمليات تُقذف فيها إلكترونات (كانت تسمى عادة أشعة بيتا) من الذرات. استغرق الفيزيائيون زمنًا بالغ الطول لفهم ماذا يجري هنا، وذلك لأنه بدا أن طبيعة هذه الظاهرة تتغير كلما زاد الفيزيائيون عمقًا في سبر بنية الذرة.

ليس مما يثير الدهشة أن تستطيع «الذرات» قذف إلكترونات، لأن الذرات كلها تحوي إلكترونات. إلا أن التجارب بينت أن الإلكترونات المتضمنة في اضمحلال بيتا تأتي بالفعل من «نوى» الذرات، والنوى لا تحوي إلكترونات، وإنما تحوي فقط نيوترونات وبروتونات. اكتشف القائمون بالتجارب بعدها أنه يحدث في اضمحلال بيتا أن أحد النيوترونات يلفظ إلكترونًا ويتحول هو نفسه إلى بروتون. لا يحدث تغير في إجمالي الشحنة الكهربائية في الكون لأن الموجب والسالب يلغي أحدهما الآخر، إلا أنه كما يبدو قد تخلق فرميونًا جديدًا. وبالإضافة إلى ذلك، حتى يحدث توازن مع الطاقة وكمية الحركة للإلكترون المقذوف، يبدو أنه لا بد أن يكون هناك جسيم غير مرئي ينطلق بعيدًا من النيوترون المضمحل في الاتجاه المضاد. تم التوصل إلى حل لكلا الأحجيتين في أوائل ثلاثينيات القرن العشرين باقتراح أنه عندما يتم في اضمحلال بيتا صنع أحد الإلكترونات من الطاقة، فإنه يتم أيضًا إنتاج فرميون زميل يسمى نيوترينو (أو لو تحدثنا على وجه الدقة فإنه لإحداث

توازن في عدد الفرميونات يتم إنتاج «مضاد» نيوترينو). جسيمات النيوترينو ليس لها شحنة ولها فقط كتلة بالغة الضآلة، ولهذا فإن إثبات هذا التخمين بالتجربة (وهو تخمين تم بواسطة الفيزيائي النمساوي ولفجانج باول) استغرق زمنًا وصل إلى خمسينيات القرن العشرين، إلا أنه تم إثباته بالفعل. ولكن حتى بعد ذلك كان واضحًا أنه لا الإلكترون ولا النيوترينو يوجد أي منهما «داخل» النيوترون، يحدث في اضمحلال بيتا أن يعاد تنظيم البنية الداخلية للنيوترون لتنطلق طاقة في شكل هذين الجسيمين الاثنين، ويتحول النيوترون إلى بروتون.

تم الآن فهم ذلك بلغة من الكواركات. يحوي النيوترون كواركين اثنين من النوع السفلي وكواركا واحدًا علويًّا، بينما يحوي البروتون كواركين علويين وكواركًا واحدًا سفليًّا. الكوارك السفلي لديه شحنة كهربائية سالبة مقدارها ثلث مقدار شحنة الإلكترون، والكوارك العلوي لديه شحنة موجبة مقدارها ٢/٣ شحنة الإلكترون. ومن ثم عندما يتحول كوارك سفلي إلى كوارك علوي، فإنه يجب أن تنطلق بعيدًا وحدة شحنة سالبة، وغياب هذه الشحنة السالبة — في مثل رائع لأن العلامتين السلبيتين تصنعان علامة موجبة — يخلف وراءه توازنًا عامًّا من وحدة شحنة موجبة واحدة، هكذا يغدو النيوترون بروتونًا. الشحنة السالبة تُنقل بعيدًا بواسطة إلكترون، كما أن بعض الطاقة الفائضة تنقل بعيدًا بواسطة مضاد نيوترينو. هكذا فإن كلًّا من العدد الكلي للفرميونات والمقدار الكلي للشحنة الكهربائية في الكون يبقى كما هو. بما أن كتلة الكوارك السفلي أكبر من كتلة الكوارك العلوي، والكتلة تساوي الطاقة، فإن كل شيء يكون في حالة توازن متقن. هذا طالما سيوجد، أو أنه يوجد هناك نوع جديد من التفاعل يجري ما بين الجسيمات المتضمنة هنا.

أصبح هذا النوع «الجديد» من التفاعل يعرف بأنه التفاعل الضعيف (لأنه ليس قويًّا مثل التفاعل القوي)، وقد تم تطوره ليوفر لنا تبصرًا نافذًا في العمليات التي تشمل اضمحلال النشاط الإشعاعي (عندما تنشق النوى منفصلة) والاندماج النووي (عندما تنضم النوى معًا لتصنع نوى أكثر تعقيدًا، كما يحدث داخل النجوم). حتى يتوافق التفاعل الضعيف مع

معطيات التجارب، فإنه يتطلب وجود ثلاثة أنواع من البوزونات: بوزون دابليو+ (W^+)، وبوزون دابليو− (W^-) وكل منهما تحمل الوحدة المناسبة من الشحنة الكهربائية، وبوزون زد (Z) وهو متعادل كهربائيًّا. هذا أسهل في التعامل رياضيًّا من الديناميكا اللونية الكمومية، ولكنه أكثر صعوبة من الكهروديناميكا الكمومية. على الرغم من أن نظرية التفاعل الضعيف تصف الآن ما هو أكثر كثيرًا من اضمحلال بيتا البسيط، فإنه لتكملة تلك القصة فإن الصورة الجديدة لاضمحلال بيتا تصور كواركًا سفليًّا يبعث طاقة في شكل بوزون دابليو− (W^-) ليحول نفسه إلى كوارك علوي، ثم بعد زمن قصير جدًّا تحول طاقة البوزون دابليو− (W^-) نفسها إلى كتلة في شكل إلكترون ومضاد نيوترينو.

جسيمات دابليو وزد لها كتلة مثلها مثل الجلونات، ويمكننا التنبؤ بكتلتها من النموذج. من أعظم انتصارات النموذج المعياري أنه عندما كُشف عن هذه الجسيمات في أوائل ثمانينيات القرن العشرين في معمل (سيرن) بالقرب من جنيف، وُجد أن لها بالضبط الكتل التي تنبأ بها النموذج. على أنه بحلول ذلك الوقت أصبح النموذج المعياري أكثر تعقدًا من بعض النواحي، وإن كان قد غدا أبسط في نواحٍ أخرى.

جوهر النموذج المعياري أنه يصف العالم الفيزيائي المألوف بلغة هي فحسب من أربعة جسيمات[٤] وأربعة تفاعلات. الجسيمات الأربعة هي الإلكترون والنيوترينو (التي تعرف معًا باللبتونات)[٥] والكواركات العلوية والسفلية. التفاعلات الأربعة هي الجاذبية، والكهرومغناطيسية، والتفاعلات النووية الضعيفة والقوية. هذا هو كل ما يحتاجه الفيزيائيون لتفسير كل الظواهر الطبيعية على الأرض، وكذلك أيضًا كل ما تفعله الشمس والنجوم التي نستطيع رؤيتها في السماء. إلا أنه ثبت في النهاية أن هذا ليس كافيًا لتفسير كل ما يلاحظ في الظروف غير الطبيعية للعمليات ذات الطاقة العالية التي تجري في معجلات الجسيمات، مما أدهش الفيزيائيين.

[٤] يعني بذلك بالطبع أربعة «أنواع» من الجسيمات، وسيكون من الحذلقة أن نوضح ذلك في كل مرة. (المؤلف)

[٥] اللبتونات: اللبتون جسيم خفيف يشبه الإلكترون إلى حد ما. هناك ٦ لبتونات هي الإلكترون، والميون والتاوون، وثلاثة جسيمات مصاحبة من النيوترينو. (المترجم)

يبدو حقًّا أن هناك أربعة تفاعلات لا غير تعمل في الكون. المفاجأة هي أن عالم الجسيمات لا يقتصر على أن يتضاعف بمثلين عند الطاقات العالية وإنما يتضاعف بثلاثة أمثال. عندما تتاح الطاقة بمقدار كافٍ، يمكن إنتاج كمٍّ هائل من نظائر قصيرة العمر تناظر كل الجسيمات الأربعة الأساسية، وذلك على مدى من جيلين آخرين. هناك أولًا نظير ثقيل للإلكترون يسمى الميون ويصاحبه نيوترينو الميون، وهناك كذلك كواركان أثقل اسمهما السحر والغريب، ثم هناك «إلكترون» أثقل يسمى التاو وما يخصه من نيوترينو التاو، ثم كواركان ثقيلان جدًّا سميا القمة والقاع. أثبتت التجارب البارعة في (سيرن) بما يتجاوز أي شك أن هذه هي نهاية القصة؛ مهما كان كبر مقدار الطاقة التي نضعها في اصطدام الجسيمات لن يحدث قط أن نصنع جيلًا رابعًا من الجسيمات.

عندما يتم إنتاج هذه الجسيمات الثقيلة في المعجلات فإنها تضمحل في التو، وتتحلل في النهاية إلى الجسيمات الجيل الأول المألوفة. ومن ثم فإنها في عالمنا الحالي لها فحسب أهمية أكاديمية. ولكنها في الظروف ذات الطاقة النشطة في الكون المبكر يمكن أن يتم إنتاجها بوفرة، وسيكون لها تأثير في طريقة تطور الكون. لا يعرف أحد سببًا لأن يكون الكون بالغ الإسراف إلى حد أن يتيح وجود هذه النسخ الأثقل من المجموعة الأساسية للجسيمات الأربعة الأولية. هذه مجرد علامة أخرى على أن النموذج المعياري ليس هو الكلمة الأخيرة في الفيزياء.

على أنه لا داعي لليأس. فحتى عندما كان النموذج المعياري يدمج هذه الإضافة غير المرحب بها في حديقة حيوانات الجسيمات، فإنه كان يمحو أحد التفاعلات من مخططه ويوضح الطريق لإزالة تفاعلات أخرى.

بصرف النظر عن كتلة وشحنة الجسيمات، فإن المعادلات التي تصف بوزونات دابليو وزد كجسيمات مصاحبة للمجال الضعيف تشابه تمامًا المعادلات التي تصف الفوتون كجسيم مصاحب للمجال الكهرومغناطيسي. الشحنة الكهربائية قد تم وصفها بالفعل بواسطة معادلات ماكسويل عن الكهرومغناطيسية. أدرك الفيزيائيون في ستينيات القرن العشرين أنهم إذا أمكنهم العثور على طريقة لإضافة كتلة للفتونات فسيكون لديهم

مجموعة واحدة من المعادلات تصف معًا المجال الكهرومغناطيسي والمجال الضعيف — سيكونون هكذا قد وحدوا المجالين في تفاعل واحد هو «الكهروضعيف». تطلّب سعي المنظرين لتوحيد هذين التفاعلين أن ينطلقوا خلال العديد من المسالك المسدودة حتى يقعوا على نموذج مُرضٍ — وكلمة «مُرضٍ»، كما هو الحال دائمًا، تعني صنع تنبؤات تتوافق مع نتائج التجارب. النموذج الذي توصل إليه المنظرون، وهو الآن مكون أساسي للنموذج المعياري، قد نشأ بالفعل عن محاولات أجراها الفيزيائي البريطاني بيتر هيجز وهو يعمل في (سيرن) للعثور على نموذج للتفاعل القوي. كما هو الحال دائمًا، كان هناك أفراد كثيرون شاركوا في إنشاء النموذج، إلا أن هيجز هو الذي أعطى اسمه لهذه الظاهرة.

الفكرة التي توصل إليها هيجز هي أن الجسيمات كلها في جوهرها الداخلي تكون بلا كتلة، ولكن الكون كله مليء بمجال «جديد» لم يسبق أن خطر على بال، ويتفاعل مع الجسيمات ليمنحها كتلة. يعرف هذا المجال الآن بأنه مجال هيجز. إحدى الطرائق السهلة لتصور ما يجري هي أن نتخيل طريقة تغير سلوك مركبة فضاء لو كان الفضاء يمتلئ فعلًا بغاز لا مرئي مثل الهواء. في الفضاء الخاوي، عندما نستخدم المحركات الصاروخية لمجس فضاء لتوفر دفعًا ثابتًا للمجس، فإنه سيتسارع بمعدل ثابت طالما يستمر المحرك في الاشتعال. ولكن لو كان المجس يتحرك خلال بحر من الغاز يتسق اتساقًا كاملًا، فإن المحركات عندما تنطلق مشتعلة بنفس المعدل الثابت من السرعة فإنه لن يتسارع بمعدل السرعة نفسها بسبب المقاومة التي يسببها الغاز. سيكون التأثير مماثلًا لما سيحدث لو كان المجس أثقل (أكثر كتلة) مما هو عليه حقًّا. وبطريقة مماثلة فإن الجسيمات التي لا كتلة لها التي تتحرك خلال مجال هيجز تلقى «مقاومة» يبدو أنها تعطيها كتلة، بحيث يعتمد مقدار الكتلة المضبوط على طبيعة الجسيم المفرد وقوة التأثير الذي يحس به من مجال هيجز.

يعطي هذا النموذج تنبؤات حول كتل جسيمات دابليو وزد، وفي ١٩٨٤ وصلت التجارب في (سيرن) إلى مقادير من الطاقة يمكن عندها إنتاج جسيمات بالكتلة المطلوبة بما يتفق مع معادلة ط = ك س^{٢}. وُجدت

الجسيمات وهي بالضبط كما سبق التنبؤ به ولها بالضبط الكتل المناسبة. يُعد هذا أحد النجاحات العظيمة للنموذج المعياري. إلا أن النموذج يصنع أيضًا تنبؤًا آخر مهمًّا لم يختبر بعد.

حسب هذا النموذج، فإن مجال هيجز، مثل كل المجالات، لا بد أن يكون له جسيم يصاحبه — وهو بوزون هيجز. هذا الجسيم أثقل كثيرًا من أن يتم إنتاجه في أي تجربة نُفذت حتى الآن على الأرض. إلا أن هناك معجل جديد اسمه «معجل اصطدام الهادرون[٦] الكبير» The Large Hadron Collider, LHC خطط له أن يبدأ عمله في ٢٠٠٧ في سيرن.[٧] يمكننا إدراك بعض فكرة عن الجهد المطلوب لسبر طبيعة الكون على هذا المستوى وذلك عن طريق ما يعطيه لنا حجم هذا المعجل وتكلفته. معجل LHC مدفون تحت الأرض على عمق مائة متر في نفق دائري محيطه ٢٧ كيلومترًا، ومحفور في صخر صلب، وسيأخذ المعجل حزمًا من البروتونات سبق تعجيلها لتصل إلى طاقة عالية في المعجلات الموجودة من قبل في (سيرن) وترسل هذه الحزم في طريقين مضادين حول الحلقة لتصطدم اصطدامًا مباشرًا بطاقة اصطدام تبلغ ١٤ تيرا إلكترون فولت (Tev، الوحدة من Tev هي ألف مليار أو ترليون إلكترون فولت). يماثل هذا تقريبًا طاقة الحركة (الطاقة الحركية) لبعوضة طائرة — ولكنها محبوسة في حيز حجمه أصغر بألف مليون مرة من البعوضة. هذه طاقة كافية لصنع ألف بروتون تنتج من الطاقة الخالصة. معجل LHC سيتمكن أيضًا من إحداث اصطدام لحزم من نوى الرصاص إحداها بالأخرى عند طاقات تزيد قليلًا عن ١٠٠٠ تيرا إلكترون فولت. سيستخدم المعجل ١٢٩٦ من المغناطيسات فائقة التعجيل و٢٥٠٠ مغناطيس آخر لتوجيه وتعجيل حزم الجسيمات، ويصل في تكلفته إلى ما يقرب من ٥ مليارات يورو (أقل بقليل من ٣٫٥ مليار جنيه إسترليني أو ٦ مليارات دولار). هذا هو الثمن الذي يجب أن ندفعه إذا كنا نريد أن نختبر

[٦] الهادرون: جسيم مادة تحت ذري يحس بالقوة القوية، والهادرونات تشمل الباريونات والميزونات وكلها مصنوعة من الكواركات. وكمثل فإن البروتون والنيوترون باريونات، في حين أن الميزون يتكون من كوارك ومضاد كوارك، الميزونات تربط البروتونات والنيوترونات. (المترجم)

[٧] حتى وقت ترجمة هذا الكتاب ٢٠٠٩ أجريت تجربة واحدة بهذا المعجل بعد مصاعب فنية عطلت التجربة في أول الأمر. للآن لم يتم إعلان نتائج التجربة وتفسيرها. (المترجم)

النموذج المعياري. إذا كان النموذج المعياري صحيحًا حقًّا، فإن معجل LHC ينبغي أن يبدأ في إنتاج جسيمات هيجز سريعًا بعد أن يتم تشغيله بالكامل. إذا وجد بوزون هيجز حسب التنبؤ به، فسيؤدي هذا إلى أن يغدو النموذج المعياري موثوقًا به إلى حد بعيد، وسيكون من المؤكد أن ينال بيتر هيجز جائزة نوبل؛ إذا لم يتم اكتشافه بالكتلة المتنبأ بها، فسيوضح هذا الطريق نحو نموذج أفضل للعالم تحت الذري.

هكذا فإن النموذج المعياري لفيزياء الجسيمات، النموذج الذي نعتقد أننا «نعرفه»، يتضمن الآن أربعة جسيمات أساسية موجودة في زوجين (إلكترون، وبروتون وكواركين علوي وسفلي)، وهي جسيمات تتكرر (لأسباب غير معروفة) في جيلين اثنين آخرين. وهو يتضمن أيضًا ثلاثة تفاعلات (الجاذبية، والتفاعل الكهروضعيف، والتفاعل القوي، يضاف لها مجال هيجز). هذه الحزمة تفسر كل شيء فوق الأرض، كما تفسر طريقة عمل النجوم. إلا أن الفيزيائيين يريدون فعل المزيد، فهم يريدون تفسير أسئلة مثل من أين أتى الكون، وكيف وصلت النجوم والكواكب إلى الوجود. كما سوف نرى في الفصل الثالث، هناك أدلة قوية على أن الكون بدأ بكرة نار ساخنة تتضمن طاقات أعظم كثيرًا من أي شيء يمكن التوصل إليه في تجاربنا. ومن ثم، فإنه حتى نحاول أن نفهم من أين أتى العالم، ثم في النهاية من أين أتينا «نحن»، سيكون على المنظرين أن يذهبوا إلى مدى يتجاوز النموذج المعياري للأمور التي «نعتقد» أننا نعرفها.

الفصل الثاني

هل هناك نظرية لكل شيء؟

أدى نجاح توحيد القوة «الكهروضعيفة» إلى تشجيع الفيزيائيين لمحاولة توحيد التفاعل الكهروضعيف مع التفاعل القوي، وأن يحلموا بدمج الجاذبية لاحقًا مع باقي الحزمة. النماذج التي تحاول أن تصف التفاعل الكهروضعيف والتفاعل القوي معًا في حزمة رياضية واحدة تسمى عادة النظريات الموحدة الكبرى Grand Unified Theories = GUTS؛ النظرية التي تضم أيضًا الجاذبية ستكون نظرية كل شيء Theory Of Everything = TOE. في كلتا الحالتين، ومع الوضع الحالي لمعرفتنا، قد يكون من الأفضل أن نستخدم بدلًا من كلمة «نظرية» كلمة «فرض» أو «نموذج»، إلا أن الاختصارات لن تكون بالدرجة الملائمة نفسها. وما نحاول نحن الفيزيائيين عمله هو فهم القوانين التي تحكم تطور الكون بطريقة مماثلة للطريقة التي يحاول بها كتاب السير أو المؤرخون فهم الدوافع الكامنة وراء قرار شخصية كبرى مثل يوليوس قيصر، فما نعرفه هو نتائج هذه القرارات، وبتحليلها نستطيع استنتاج الدوافع. وبالمثل نحن نعرف نتائج عمل القوانين الفيزيائية التي تحكم الكون، وبتحليلها نستطيع استنتاج تلك القوانين.

وكما هو الحال مع التاريخ، نستطيع الوصول إلى رؤى مختلفة عن طريق النظر إلى الأحداث من زوايا مختلفة. فعلى سبيل المثال، على الرغم من أننا طرحنا فكرة المجال الضعيف بلغة من اضمحلال النيوترون، فإن هناك جانبًا آخر لهذا النوع من التفاعل يساعد في إظهار طريقة بناء النظريات الموحدة الكبرى. بدلًا من أن يلفظ أحد النيوترونات إلكترونًا ومضاد نيوترينو ليحول نفسه إلى بروتون، يستطيع نيوترينو يأتي من الخارج أن يتفاعل

مع النيوترون عن طريق التفاعل الضعيف (أو إذا تحدثنا بدقة فإنه يتفاعل مع الكوارك السفلي داخل النيوترون). يتحول النيوترينو في هذه العملية إلى إلكترون (والنيوترون إلى بروتون). وبكلمات أخرى يستطيع التفاعل الضعيف أن يغير أحد أنواع اللبتونات إلى نوع آخر. في نموذج الديناميكا اللونية الكمومية، عندما تتحرك الجلونات بين الكواركات فإنها تحمل معها شحنة لون، وبهذا فإنها تستطيع أن تغير لون الكواركات (أو ينبغي أن نقول إنها تغير شحنة اللون). وبكلمات أخرى يستطيع التفاعل القوي أن يغير أحد أنواع الكواركات إلى نوع آخر، وهذه حيلة يفعلها أيضًا التفاعل الضعيف ولكن بطريقة مختلفة عندما يغير كواركًا سفليًّا إلى كوارك علوي داخل أحد النيوترونات. وهكذا فإنه يمكن تغيير أحد أنواع الجسيمات (أو أحد أنواع الفرميونات) إلى الآخر. كان السؤال الذي أخذ الفيزيائيون يوجهونه لأنفسهم هو هل من الممكن العثور على نموذج يمكن فيه تغيير نوع من حامل لشحنة (نوع من بوزون) لآخر، وأدت محاولاتهم للإجابة عن هذا السؤال إلى نشأة النظريات الموحدة الكبرى في أعقاب نجاح توحيد القوى الكهروضعيفة ونموذج الديناميكا اللونية الكمومية.

على أننا في الحقيقة لا يزال علينا أن نتحدث حول مجموعة منوعة مما هو ممكن من النظريات الموحدة الكبرى، بدلًا من نظرية واحدة حاسمة، وهذه الحقيقة تبين أن هذا البحث لم يكتمل بعد. على أن كل هذه النماذج (كما ينبغي أن نسميها) تتضمن مفتاحًا مهمًّا واحدًا: البوزونات التي تستطيع أن تغير «نوعًا» من الشحنة إلى «نوع» شحنة آخر ستكون قادرة على أن تحول اللبتونات إلى كواركات، والعكس بالعكس. لم يكن في هذا أي مفاجأة كبيرة، لأنه مع اكتشاف أن الكواركات واللبتونات تأتي في ثلاثة أجيال، في كل جيل منها زوج من اللبتونات وزوج من الكواركات، فإن هذا الاكتشاف كان فيه ما يشير بالفعل إلى وجود صلة أساسية بين نوعي الفرميونات. على أنه يعني أنه كما أن النيوترونات تستطيع أن تتفاعل مع بوزونات المجال الضعيف لتضمحل إلى بروتونات، فإنه بمثل ذلك تمامًا ينبغي أن تكون البروتونات قادرة على التفاعل مع بوزونات المجال الموحد لتحول نفسها إلى لبتونات. وبكلمات أخرى فإنه حتى البروتونات ينبغي

أن تضمحل، عندما تتحول الكواركات داخلها إلى لبتونات. هذا تنبؤ حازم وقابل للاختبار لكل هذه العائلة بأسرها من النظريات الموحدة الكبرى.

البوزونات المفترضة للمجال الموحد سميت جسيمات إكس X وواي Y. لم يتم قط الكشف عن هذه الجسيمات، إلا أن هذا ليس فيه ما يبعث على الدهشة لأن النماذج تخبرنا بأن هذه الجسيمات لا بد أن يكون لها كتل هائلة، بمقاييس الجسيمات — وتكون عادة بمليون مليار مرة، أي ١٠^١٥ ضعف كتلة البروتون، بحيث إن صنعها سيتطلب معجلًا له القدرة على أن يصل إلى طاقات قدرها يزيد بألف مليار ١٠^١٢ ضعف عن الطاقات التي عثر عندها على جسيمات دابليو وجسيمات زد.[١] الأنواع المختلفة من جسيمات إكس وواي يكون لها أيضًا شحنات كهربائية تساوي موجب أو سالب ٣/٤ من الشحنة على أحد الإلكترونات، أو موجب أو سالب ٣/١ الشحنة على أحد الإلكترونات، كما أنها تأتي أيضًا بشحنات لون مختلفة. حاليًّا لا يمكن للبروتون أن يضمحل إلا إذا استطاع أن «يقترض» قدرًا كافيًا من الطاقة من عدم اليقين الكمومي، في شكل تراوح للفراغ، وذلك حتى يصنع بوزونا كهذا للحظة وجيزة.

إذا استطاع البروتون أن يفعل ذلك، فإن أحد أشكال اضمحلال البروتون سيكون مساره كالتالي: يقوم كوارك علوي داخل البروتون (بشحنة ٣/٢) بتحويل نفسه إلى مضاد كوارك علوي (بشحنة –٣/٢) ويطلق بوزون إكس (حتى وإن كانت كتلة البوزون أكبر كثيرًا من كتلة الكوارك!)، بوزون إكس (شحنة ٣/٤) سيتفاعل أيضًا مع كوارك سفلي مجاور، ليحوله إلى بوزيترون.[٢] سيخلف هذا مضاد الكوارك العلوي متزاملًا مع الكوارك الوحيد الباقي من البروتون، كوارك علوي. الكوارك العلوي هو ونظيره من المادة المضادة، مضاد الكوارك العلوي، سيشكلان حالة من ارتباط مؤقت (يسمى

---

[١] الوحدات التي يستخدمها علماء فيزياء الجسيمات لقياس الكتلة تسمى إلكترون فولت (ev)، كتلة البروتون هي تقريبًا جيجا (مليار) من الإلكترون فولت (1 Gev). وهكذا فإن كتلة جسيم إكس تكون تقريبا ١٠^١٥ جيجا إلكترون فولت. الحقيقة أن الفيزيائيين يقيسون الطاقة والكتلة معًا بوحدات الإلكترون فولت، حيث إن أينشتاين قد اكتشف أن الكتلة والطاقة تساوي كل منهما الأخرى. عامل c^2 (س^٢) الذى يظهر في معادلة أينشتاين البالغة الشهرة يتم تفهمه وتقبله هكذا. (المؤلف)

[٢] البوزيترون: مضاد الإلكترون وله نفس كتلته ولكن شحنته موجبة. (المترجم)

البيون)،[٣] إلا أنه سرعان ما يبيد أحدهما الآخر، ليتخلف عن ذلك بوزيترون وتفجر من إشعاع كهرومغناطيسي نشط (فوتونات) ويكون هذا هو الأثر الوحيد من البروتون الأصلي. على أن كل شيء يعتمد على اقتراض الطاقة من الفراغ لصنع بوزون إكس افتراضي لزمن يكفي لأن يحدث التفاعل. بوزون إكس الافتراضي يظل موجودًا لزمن بالغ الصغر بحيث إنه لا يستطيع أن ينتقل إلى أبعد من ١٠$^{-٢٩}$ سنتيمترًا يختفي بعدها، ومن ثم فإنه حتى يمكن أن يُجعل تأثيره محسوسًا، فلا بد أن يقترب كواركان أحدهما من الآخر لمسافة هي على الأقل ١٠$^{-٢٩}$ سنتيمترًا.

تخبرنا النماذج عن مدى احتمال أن يحدث ذلك. وفقًا للحسابات التي تتأسس على أبسط صور هذه النماذج، فإن احتمال أن مقدارًا كافيًا من الطاقة سيظهر من لاشيء مطلقًا، أي كتراوح للفراغ داخل بروتون مفرد؛ لهو احتمال بالغ الصغر، بحيث لو كان لدينا صندوق مليء بالبروتونات وانتظرنا لما يزيد تقريبًا عن ١٠^{٣٠} سنة (أي ما هو تقريبًا ١٠٠ مليار مليار ضعف عمر الكون) فسنجد أنه سيضمحل فقط نصف هذه البروتونات. لا يهم هنا ما يكونه عدد البروتونات التي بدأنا بها. إذا بدأنا بألف بروتون، فإنه بعد مرور كل هذا الزمن سنجد أن خمسمائة منها قد اضمحلت؛ وإذا بدأنا بعدد من مليار بروتون فإنه بعد مرور كل هذا الزمن سنجد أن نصف مليار منها قد اضمحلت. هذا القياس الزمني يُعرف لأسباب واضحة، بأنه عمر النصف للبروتون، وهناك أعمار نصف مختلفة مميزة لكل هذه العمليات الاضمحلالية. (مثال ذلك أن عمر النصف لنيوترون خارج النواة هو ١٠٫٥ دقيقة — أما داخل النواة فالأمر يختلف). من الواضح بالنسبة للبروتون المفرد أن احتمال أن يحدث اضمحلال كهذا أثناء حياة إنسان هو احتمال صغير إلى حد التلاشي. إلا أن هناك الكثير من البروتونات في الكون (يحوي جسمك مثلًا ما يقرب من ١٠^{٢٩} من البروتونات). إذا راقبت بروتونات كثيرة لزمن قصير نوعًا، ينبغي أن ترى أن هناك على الأقل عددًا صغيرًا منها يضمحل. إذا راقبت كتلة من المادة تحوي ما يقرب من عشرة

[٣] البيون: هو ميزون باي أكثر الميزونات شيوعًا. والميزون جسيم يحس بالقوة القوية أي أنه أحد الهادرونات. يتكون الميزون من كوارك ومضاد كوارك، والميزونات تربط البروتونات والنيوترونات. (المترجم)

أطنان من خامة لها عمر نصف $١٠^{٣٠}$ سنة ينبغي أن ترى ما يقرب من خمسة اضمحلالات بكل سنة. يصدق هذا على أي شيء — الماء، والحديد، والمقانق (السجق)، وأي شيء يحوي بروتونات. أجرى العلماء تجارب من هذا النوع (وهم غالبًا يستخدمون خزانات ماء كبيرة، حيث إنه يسهل تداوله)، باحثين عن البوزيترونات التي تنتج عن هذا الاضمحلال وتشي به. حتى الآن لم يتمكن العلماء من رؤية أي أثر لاضمحلال بروتون، وهذا يخبرنا بأن عمر النصف للبروتون هو على الأقل ٥×١٠^{٣٢} من السنين (أي خمسة يعقبها اثنان وثلاثون صفرًا من السنوات). هذا زمن أطول من عمر النصف الذي تنبأت به النظريات الموحدة الكبرى الأصلية. ولكن هذه الأنباء في الواقع أنباء طيبة، لأن الجهود لتحسين هذه النماذج لأسباب أخرى قد أدت إلى تغيرات في الحسابات تتضمن عمر نصف أطول للبروتون.

أحد هذه التحسينات له علاقة بالطريقة التي يبدو بها أن شدة إحدى القوى تتغير عندما نقترب من أحد الجسيمات. عندما تحدثنا من قبل عن شدة قوى التفاعل، كنا نشير إلى شدة القوة التي تقاس على مسافة بعد لها قدرها من الجسيم المشارك في الأمر، وذلك بالمقارنة بحجم الجسيم. حيث إن «المسافة التي لها قدرها» بالنسبة للإلكترون لا تزال ضئيلة بالمقاييس البشرية، فإن هذا فيه أول تقريب جيد. إلا أن سحابة الجسيمات الافتراضية المشحونة التي تحيط بأحد الإلكترونات تحجب وتحمي جزئيًّا شحنته الداخلية المكشوفة من العالم الخارجي. هذه الحماية تجعل التفاعل الكهرومغناطيسي يبدو من على بعد أضعف مما لو أمكنك أن تقترب حقًّا من أحد الإلكترونات، ومن ثم فإنه بالنسبة للإلكترون أو أي جسيم آخر مشحون كهربائيًّا، نجد أنه عند المقاييس الصغيرة جدًّا يبدو أن قوة التفاعل الكهرومغناطيسي تصبح أقوى عندما نقترب من الجسيم. ومن الجانب الآخر، فإن طريقة تفاعل الكواركات والجلونات مع الجسيمات الافتراضية تجعل التفاعل القوي يصبح أضعف عندما نقترب من جسيم يحس بالتفاعل القوي. التعامل مع التفاعل الكهروضعيف أكثر تعقدًا إلى حد قليل عما في حالة الكهرومغناطيسية، بسبب تأثير كتل جسيمات دابليو وزد. عندما تؤخذ هذه في الحسبان، فإن القوة «العارية» للتفاعل تكون شدتها ما بين

شدة التفاعل القوي وشدة التفاعل الكهرومغناطيسي، وتصبح أيضًا أضعف عند المسافات الأقرب.

لو كان النموذج المعياري متقنًا إلى حد الكمال، فسيبدو أن كل هذه التفاعلات لها نفس الشدة عند مقياس مسافة معين. كما سبق ذكره فإن سبر المسافات الأقصر يتطلب تعجيل حزم الجسيمات إلى طاقات أعلى، وهذا يساوي القول إنه عند طاقة معينة ينبغي أن يُظهر كل من التفاعل القوي، والضعيف، والكهرومغناطيسي نفس شدة القوة. المسافة المتضمنة هنا تكون حقًّا ضئيلة لأقصى حد — ما يقرب من $١٠^{-٢٩}$ سنتيمترًا. يكاد يكون من المستحيل أن تستطيع التفكير فيما يعنيه رقم بهذه الضآلة، ولكن لو أن نواة ذرة نمطية مطت لتصبح كرة عرضها كيلومترًا، فإن الكيان الذي كان قد بدأ بعرض $١٠^{-٢٩}$ من السنتيمترات سيصبح بحجم نواة. الطاقة المرادفة لذلك تقرب من $١٠^{١٥}$ مثل لطاقة كتلة البروتون، وهذا يتجاوز كثيرًا أي مستويات يمكن أن نأمل بأي حال التوصل إليها في تجاربنا. إلا أنه ليس من باب الصدفة أن هذه الطاقة تناظر كتل بوزونات إكس وواي. هناك طريقة أخرى للتفكير في هذا كله بلغة من الطاقة المتاحة لصنع جسيمات جديدة. إذا كان هناك طاقة كافية لصنع بوزونات إكس وواي، فسيكون من المؤكد عندها وجود طاقة كافية لأن تصنع أيضًا جسيمات دابليو وزد، وكل الجلونات التي يمكن بأي حال أن نرغب فيها. وبهذا فإن كل الجسيمات الافتراضية يُرتقى بها إلى الواقع — فهي لا تعود بعد افتراضية وإنما ستستخدم الطاقة المتاحة لتصبح جسيمات واقعية، ليس عليها بعد أن تشكل سحابة محكمة حول جسيمات كالإلكترونات، وتستطيع هكذا أن تتجول لحسابها الخاص. هكذا يختفي التأثير الحاجب الحامي، ويكون كل ما نراه هو شحنات عارية (شحنات كهربائية، وشحنات لون، وهلم جرًّا).

هناك وجه ضعف في النموذج المعياري وامتداداته التي وصفت حتى الآن وهو أنه على الرغم من أن النموذج يتنبأ بالطاقات التي تحدث عندها كل هذه العمليات، فإنه لا يتنبأ بالضبط بالطاقة نفسها لتوحيد التفاعلات الثلاثة كلها. فهو يقول إن التفاعل الكهرومعناطيسي والضعيف يندمجان في التفاعل الكهروضعيف عند إحدى الطاقات، وإن التفاعل الكهرومغناطيسي

والتفاعل القوي يندمجان عند طاقة تختلف قليلًا، وإن التفاعل الضعيف والقوي يندمجان عند طاقة ثالثة تختلف قليلًا. ولكن هذه التوحيدات الثلاث يمكن شدها معًا لتلتقي عند نقطة واحدة بواسطة عائلة من النظريات الموحدة الكبرى (أو النماذج، تعرف باسم السمترية الفائقة[٤] أو سوسي Supersymmetry or SUSY.

قد التقينا من قبل بسمتريات يتغير فيها أحد أنواع الفرميونات إلى نوع آخر من الفرميون، ويتغير أحد أنواع البوزونات إلى نوع آخر من البوزون. في منتصف سبعينيات القرن العشرين طرح جوليان وايس في ألمانيا، وبرونو زومينو في كاليفورنيا، اقتراحًا بأن الفرميونات والبوزونات قد تكون على علاقة أحدها بالآخر بواسطة نوع آخر من عملية سمترية — هي السمترية الفائقة (السوبر سمترية) — التي تستطيع أن تحول الفروميونات إلى بوزونات أو العكس بالعكس.

هذا أمر يبدو سخيفًا مضحكًا بالنسبة للحس المشترك للحياة اليومية. كيف يمكن للمادة أن تتحول إلى قوة، أو أن تتحول القوة إلى مادة؟ إلا أن عالم الكمومية كثيرًا ما يتعارض مع الحس المشترك للحياة اليومية، وقد التقينا من قبل بشيء غريب مثل هذا تمامًا. فالموجات والجسيمات في عالم الكم قابلة لأن يتبدل أحدها إلى الآخر، وهما وجهان للشيء نفسه، حتى وإن كنا في عالم حياتنا اليومية نفكر في أشياء كالإلكترونات على أنها جسيمات ونفكر في قوى مثل الكهرومغناطيسية بلغة من الموجات. ومن ثم فليست هذه بالوثبة المذهلة عندما نفكر في الجسيمات الحاملة للقوى على أنها قابلة للتبدل مع جسيمات المادة. في لغة الكم تنص السمترية الفائقة على أن الفرميونات يمكن أن تتحول إلى بوزونات والبوزونات إلى فرميونات. ولكننا لا نستطيع أن نحول أي فرميون قديم إلى أي بوزون قديم؛ كل نوع من أحد الجسيمات يجب أن يُقرن بالنوع الخاص به من شركاء السمترية الفائقة.

[٤] السمترية الفائقة (سوسي): فكرة أنه قد لا يكون هناك نوعان مختلفان من الجسيمات للمادة والقوة (فرميونات وبوزونات)، وإنما هناك بدلًا من ذلك علاقة بين خواص هذه الجسيمات ذات البرم المختلف، بحيث إن هناك نوعًا واحدًا فقط من هذه الجسيمات، وإن كان عدد الجسيمات من هذا النوع الواحد سيكون أكثر في الطبيعة. تتنبأ السمترية الفائقة بوجود نوع جديد بأسره من الجسيمات يسمى السجسيمات Sparticles. حتى الآن ليس من دليل تجريبي يثبت وجود السجسيمات حقًّا. (المترجم)

ولكن أين يوجد شركاؤهم هؤلاء؟ إننا نعرف من قبل أن اللبتونات والكواركات تأتي في صور لها علاقات فيما بينها، بحيث إن الإلكترون هو والنيوترينو الخاص به لهما «علاقة انتماء» بالكواركين العلوي والسفلي. ولكن جسيمات المادة المعروفة ليس لأي منها، بالمعنى الملائم للسمترية الفائقة، علاقة انتماء بأي من حاملات القوى، كما أن البوزونات المعروفة لا تربطها بأي من الفرميونات. لا يثير هذا انزعاجًا للمنظرين، وهم يطرحون اقتراحًا (مع الرياضيات الداعمة لهم) بأن أي نوع من الفرميونات المعروفة (كالإلكترون مثلًا) ينبغي أن يكون له شريك سوبر سمتري (هو في حالة الإلكترون يسمى سلكترون Selectron)، وهو شريك لم يُر قط، كما أن أي نوع من البوزون (كالفوتون مثلًا) ينبغي أن يكون له نظير فيرميوني (هو في حالة الفوتون يسمى فوتينو)، وهو أيضًا لم يُر قط. هذه الكيانات المفترضة تسمى معًا بجسيمات «سوسي». تستمر المحاجة بأن السبب في أن هذه الجسيمات لم تُر قط هو أنها أول كل شيء لها كتل كبيرة (ومن ثم فإنها لم يتم صنعها في أي تجارب معجلات على الأرض)، وثانيًا، فإنها غير مستقرة، ومن ثم فإنها تضمحل فورًا إلى مزيج من الأنواع المألوفة من الفرميونات والبوزونات وجسيمات «سوسي» الأخف. هناك استثناء واحد لذلك، إن كانت فكرة السمترية الفائقة فكرة صحيحة. بالنسبة لأخف هؤلاء «الشركاء السوبر سمتريين» (وهو فيما يحتمل الفوتينو) لا بد له من أن يكون مستقرًا، لأنه لا يمكن أن يوجد شيء أخف منه ليضمحل إليه.

السبب في أن هذه الحزمة من الأفكار تؤخذ جديًّا هو أن تغيرات النموذج المعياري المطلوبة لإفساح مكان لأبسط صورة من السمترية الفائقة (التي تعرف بأنها الحد الأدنى من المسترية الفائقة) تنقل نقطة الالتقاء المتنبأ بها إلى اقترانات القوى الكهرومغناطيسية والضعيفة والقوية، بحيث تلتقي كلها بالضبط عند نقطة من طاقة تبلغ حوالي $١٠^{١٦}$ جيجا إلكترون فولت بدلًا من $١٠^{١٥}$ جيجا إلكترون فولت. إضافة السمترية الفائقة إلى المعادلات تغير أيضًا من عمر النصف المتنبأ به للبروتون لترفعه فوق المستوى الذي تم التوصل إليه حتى الآن بالتجارب.

هكذا فإنه لا يوجد دليل على أن السمترية الفائقة خطأ، وربما سيوجد سريعًا بعض أدلة على أنها صواب. أحد أسباب انفعال الفيزيائيين بحماس

بشأن ما يتوقع من «معجل اصطدام الهادرون الكبير» هو أن هذا المعجل ينبغي أن يتمكن من إنتاج شركاء سوبر سمتريين لهم كتل تصل إلى عدة آلاف مثل لكتلة البروتون (أي عدة آلاف جيجا إلكترون فولت) وينبغي أيضًا أن ينتج هذا المعجل بوزونات هيجز. إذا حدث و«لم ينتج» المعجل جسيمات هيجز، فسيكون في هذا مفاجأة كبرى وسيتطلب ذلك إعادة التفكير في كل فكرة النظريات الموحدة الكبرى (وإن كان في هذا ما يثير بهجة الفيزيائيين لأنه سيمنحهم شيئًا يفكرون فيه). إلا أن أحد الأسباب التي تجعل هذا يبدو غير مرجح هو أن النظريات الموحدة الكبرى قد توصلت بالفعل إلى أحد الانتصارات. النظر في أصول هذا الانتصار أو هذا الدليل المواتي للنظريات الموحدة الكبرى يوضح كيف أن علماء فيزياء الجسيمات يزداد اتجاههم نحو علم الفلك للعثور على طرائق لاختبار نماذجهم.

أحد التنبؤات للحد الأدنى من السمترية الفائقة هو أن جسيمات النيوترينو ينبغي أن يكون لها كتلة ضئيلة. وفقًا للنموذج المعياري، بدون «سوسي»، ينبغي أن تكون جسيمات النيوترينو بلا كتلة مطلقًا، مثلها مثل الفوتون. ظل هذا لغزًا منذ أواخر ستينيات القرن العشرين، حتى صممت تجربة لمتابعة تدفق جسيمات النيوترينو من الشمس وأخذت التجربة تبين وصول جسيمات نيوترينو قليلة جدًّا إلى الأرض. جسيمات نيوترينو الإلكترون يتم إنتاجها بغزارة بواسطة التفاعلات النووية التي تجرى في قلب الشمس وتبقيها لامعة، وعدد هذه الجسيمات الذي يتدفق عبر الأرض (ومن خلالها) يمكن التنبؤ به من النماذج المعيارية للفيزياء النووية والفيزياء الفلكية. إلا أنه عندما أقام راي دافيز وزملاؤه تجربة لمتابعة تدفق جسيمات النيوترينو نفذوها وهم يعملون في منجم هومستيك في ليد بداكوتا الجنوبية، وجدوا فقط ما يقرب من ثلث العدد المتنبأ به. بافتراض صحة نماذج الفيزياء النووية والفيزياء الفلكية — وهناك أدلة وافرة مستقلة على صحتها — يكون أحد التفسيرات الممكنة هو أن جسيمات نيوترينو الإلكترون تتغير إلى أنواع أخرى من النيوترينو وهي في طريقها إلينا. تسمى هذه العملية بالتذبذب Oscillation، لأن جسيمات نيوترينو الإلكترون تتغير أثناء انتقالها في الفضاء إلى جسيمات نيوترينو الميون والتاو ثم تعود ثانية، أو تبقى مختلطة، لأن النيوترينوات الإلكترونية الأصلية ستكون مختلطة بكل الأنواع الثلاثة.

حيث إنه كل ما يوجد هو ثلاثة أنواع من النيوترينو، وهي مختلطة بالتساوي، فسينتج عن ذلك أن هذه العملية ستؤكد طبيعيًّا على أن كشاف دافيز سيرصد فقط ثلث التدفق الأصلي من نيوترينوات الإلكترون، وأنه لن يستطيع أن «يرى» الأنواع الأخرى. ولكن هذا التذبذب لا يعمل إلا إذا كان لجسيمات النيوترينو كتلة. كان هذا هو الحال حقًّا، وكان في ذلك اكتشاف درامي في سبعينيات القرن العشرين وفيه تطور من نوع جديد في الفيزياء. أنبأت اكتشافات «علم الفلك» الفيزيائيين بخصائص أضأل الجسيمات المعروفة. بعد هذه التجارب الرائدة أُجريت دراسات أخرى على جسيمات النيوترينو الشمسية وتمت ملاحظات مباشرة لتذبذبات النيوترينو في تجارب على الأرض وأكّد هذا كله أن علماء الفلك على صواب. جسيمات النيوترينو لها بالفعل كتلة (هي أقل من عُشر إلكترون فولت؛ وللمقارنة فإن كتلة الإلكترون تساوي ٥١١٠٠٠ إلكترون فولت)، وهي بالفعل تتذبذب. في أعقاب هذه الاكتشافات، كما سنرى سريعًا، أصبحت صلة الارتباط بين علم الفلك وفيزياء الجسيمات أقوى من أي مما كانت عليه.

عمومًا الجمع بين النظريات الموحدة الكبرى والسمترية الفائقة يبدو واعدًا لأقصى حد، ويصنع تنبؤات ينتظر أن يتم اختبارها قبل نهاية العقد الأول من القرن العشرين. إذا جرت الأمور كلها في هذه الاختبارات على الوجه الحسن، فستكون الخطوة التالية هي العثور على طرائق لدمج الجاذبية في هذه الحزمة، وصنع نظرية حقيقية (أو نموذجًا) لكل شيء. بصفة عامة ستكون طريقة التوصل إلى ذلك هي أن توصف التفاعلات الجذبوية بلغة من تبادل جسيمات تسمى الجرافيتونات،[٥] وأن يؤتى بالجاذبية داخل طيات «سوسي» بأن يُفترض وجود شريك سوبر سمتري هو الجرافيتينو. جسيمات الجرافيتون تنشأ طبيعيًّا في أي نظرية كمومية للجاذبية، تمامًا مثلما تنشأ الفوتونات طبيعيًّا في نظرية كمومية عن الكهرومغناطيسية، إلا أن إضافة الجرافيتينو هي التي تأتي بالجاذبية إلى الوصف السوبر سمتري للعالم. هذه التنويعات على لحن التوحيد يعطى لها اسم جامع هو «الجاذبية

[٥] الجرافيتون: جسيم افتراضي يحمل قوة الجاذبية، أي بوزون، ولم يكشف عنه بعد تجريبيًا، ولكن الفيزيائيين واثقون من وجوده. (المترجم)

الفائقة»[٦] Supergravity، إلا أنها كلها تتسم بالتخمين أكثر من أي مما ناقشناه إلى الآن، ولا تزال في حاجة لاختبارها بالتجربة. في أي نظرية كم للجاذبية، بما في ذلك الجاذبية الفائقة، لا بد لجسيمات الجرافيتون أن تكون بلا كتلة، مثل الفوتونات، وذلك حتى يكون للجاذبية نفس التأثير بمدى مسافة كبيرة مثل الكهرومغناطيسية. إلا أن الجرافيتونات بخلاف الفوتونات يمكنها (وفقًا للنماذج) أن يتفاعل أحدها مع الآخر، الأمر الذي يجعل إجراء الحسابات أصعب إلى حد هائل.

كما أنه يمكننا أن نصف الكهرومغناطيسية إما بلغة من الكم (الفوتونات) أو بلغة كلاسيكية (الموجات)، فبمثل ذلك تمامًا نجد أن الجاذبية يمكن أن توصف بلغة الجرافيتون أو بلغة من الموجات الجذبوية — وذلك كجزء من ثنائية الموجة والجسيم التي تعتبر في مركز نظرية الكم. هناك الكثير مما نتوقعه من دراسة الموجات الجذبوية في المستقبل القريب وهو أكثر كثيرًا مما نتوقعه من اختبار نماذج الجاذبية الفائقة بالتجارب. الجاذبية قوة يبلغ من ضعفها أنها تتطلب كشافات حساسة إلى أقصى حد لتعيين الموجات المصاحبة للجرافيتونات. إلا أن هذه الكشافات الآن لا تزال تحت الإنشاء والتجربة، وربما ستكشف عن إشعاع جذبوي خلال السنوات القليلة القادمة.

الموجات الجذبوية هي تنبؤ من نظرية أينشتاين عن النسبية العامة، وهي نظرية تتناول المكان (أو لو تحدثنا بدقة تتناول الزمكان) ككيان مرن يتشوه بوجود المادة (ونظرية أينشتاين هذه نظرية «كلاسيكية»، بمعنى أنها لا تتضمن عمليات كمومية). دعنا نفكر في الزمكان الخاوي على أنه يشبه ملاءة من المطاط (كالترامبولين) تمتد مسطحة، عندما تُدحرج كرات بلي زجاجية صغيرة عبر الملاءة ستتحرك في خطوط مستقيمة. ولكن إذا وضعنا جسمًا ثقيلًا فوق الملاءة، مثل كرة بولنج، فسوف يحدث انبعاجًا؛ لو دحرجت كرات البلي الآن قرب الجسم الثقيل فإنها ستتبع مسارات منحنية حول الانبعاج. إذا وضعنا الرياضيات المناسبة في الصورة، فإنها ستفسر

[٦] الجاذبية الفائقة: اسم يطلق على عدد من النظريات تحاول تفسير كل قوى الكون في إطار واحد، وهي نظريات توحد النسبية العامة بالسمترية الفائقة، على أنه ما من نظرية منها قد نجحت بالكامل. (المترجم)

بدقة السبب في انحراف الضوء عندما يمر بالقرب من الشمس، ومقدار هذا الانحراف — وهذا تنبؤ من نظرية أينشتاين تم اختباره على نحو مشهور وتأكد بالأرصاد التي أجريت أثناء كسوف للشمس في ١٩١٩.

ولكننا إذا ذهبنا بالأمر إلى مرحلة أبعد، نستطيع أن نتصور أن كرة البولنج تتواثب إلى أعلى وأسفل فوق ملاءة المطاط وتصنع تموجات في نسيجها. عندما تهتز المادة بالطريقة المناسبة في الكون ككل سينتج عن ذلك تموجات في الزمكان، حسب معادلات أينشتاين، وينبغي أن يكون في الإمكان الكشف عن هذه التموجات في شكل موجات في المكان (الفضاء) ذي الأبعاد الثلاثة. يكون هذا التأثير في الواقع صغيرًا نوعًا، لأن الجاذبية قوة بالغة الضعف عندما تقارن بالقوى الثلاث الأخرى للطبيعة — وأي بنى منتظمة في الكون (بما فيها نحن أنفسنا) سوف تتفتت بالإشعاع الجذبوي وهو يمر جيئة وذهابًا عبر الكون. على أن أشد «الاهتزازات» التي تنتج عن المادة، مثل تقلص أحد النجوم إلى ثقب أسود،[٧] هي مما ينبغي أن ينتج عنه تموجات كبيرة في الفضاء يكفي حجمها لأن يكتشفها الجيل الجديد من أجهزة الكشف. هناك أدلة واضحة على وجود الإشعاع الجذبوي أتت بالفعل من الدراسات الفلكية لمنظومة تعرف «بالنابض الثنائي»، وفيها يوجد نجمان من نجوم النيوترون[٨] يدور أحدهما حول الآخر. هكذا فنحن نعرف على وجه التأكيد أن أينشتاين كان مصيبًا وأن هناك وجود لهذا الإشعاع. إلا أن الفيزيائيين ما زالوا في لهفة للكشف عن الموجات الجذبوية هنا فوق الأرض، وينبغي أن يصلوا إلى ذلك سريعًا جدًّا.

لسنا نهدف إلى الدخول في تفاصيل كثيرة حول كل التجارب التي سنذكرها في هذا الكتاب؛ فالنتائج لها أهمية أكبر من ذكر تفاصيل طريقة التوصل لها. ولكن لعل الأمر يستحق أن نختار مثلًا واحدًا ليمثل لنا نوع

---

[٧] الثقب الأسود: منطقة في الزمكان لها جاذبية قوية جدًّا لا يستطيع أي شيء أن يفر منها، ولا حتى الضوء؛ فلا يمكن رؤيتها. الثقب الأسود النجمي بقية منضغطة لنجم ميت. (المترجم)

[٨] نجم نيوتروني: نجم قد استنفد وقوده النووي فتقلص على نفسه حتى استقر في حجم صغير كنجم نيوتروني، وهي نهاية تتوقف على كتلة النجم الأصلي. النجم النيوتروني نجم بارد يقوم على التنافر بين النيوترونات. (المترجم)

التعاون الدولي الذي يشمل فرقًا كبيرة من الباحثين هي الشكل النمطي الآن لطريقة أداء العلم في العقود الأولى من القرن الحادي والعشرين.

يجرى الآن العمل في أربع من هذه التجارب الجديدة عن الموجة الجذبوية. أكبرها وهي «ليجو LIGO» في الولايات المتحدة، هناك أيضًا تجربة في اليابان اسمها «تاما TAMA»، وتجربة فرنسية إيطالية مشتركة اسمها «فيرجو VIRGO»، وتجربة سنصفها بشيء من التفصيل، وفيها كشاف بريطاني ألماني مشترك يعرف باسم «جيو ٦٠٠ GEO600». ليست هذه التجارب مجرد تنافس تتكرر فيه لأربع مرات جهود قد يعتقد القارئ أنه كان ينبغي أن تكرس لمشروع عالمي واحد. يحتاج الأمر لكشافين اثنين على الأقل لمجرد أن نتأكد من أننا قد اكتشفنا حقًّا موجات جاذبية، لأنهما قد سجلا معًا هذه الذبذبات في الوقت نفسه، بما يثبت أن الموجات ليست اضطرابًا محليًّا ناجمًا عن مرور شاحنة أو انهيار أرضي. كذلك فإنه حتى نعيّن موضع مصدر الموجات في السماء، وخصائص أخرى تفصيلية للإشعاع، نحتاج إلى كشافات عددها أربعة على الأقل. تعمل الأجهزة كلها على أساس مبادئ متماثلة، ولكن جهاز «جيو ٦٠٠» هو من بعض النواحي أكثرها رقيًّا وتعقدًا، ذلك أن وجود قيود مالية شديدة قد أدى إلى إجبار القائمين بالتجربة على استخدام أقصى الإبداع لتطوير تكنولوجيا جديدة لإنجاز أهدافهم. أدت القيود المالية نفسها إلى إجبار الفرق البريطانية والألمانية على التعاون معًا في نهاية ثمانينيات القرن العشرين تعاونًا ثبت في النهاية أن له نتائجه البهيجة، ذلك أن كلًّا من بريطانيا وألمانيا لا تستطيع أن تتحمل وحدها تكلفة كشاف موجات جذبوية خاص بها. هذه تقريبًا هي الطريقة نفسها تمامًا التي تؤدى بها مشروعات العلم الكبير في القرن الحادي والعشرين، وكما سوف نرى، فإن من النادر جدًّا في أبحاث الطليعة الآن أن ينفذها بلد واحد يعمل منعزلًا، (ناهيك عن أن تنفذها مجموعة بحث واحدة في جامعة واحدة). ولَّت منذ زمن طويل أيام العبقري الواحد الفريد — كنيوتن أو أينشتاين.

اختصار جيو GEO كاسم للمشروع تأتي من أول حروف «المرصد الأوروبي الجذبوي Gravitational European Observatory» — الترتيب

الأكثر طبيعية للكلمات هو المرصد الجذبوي الأوروبي European Gravi-tational Observatory، إلا أنه كان هناك إحساس بأنه ستكون له عندها اختصار (EGO)[٩] وهي تعطي صورة عامة في اتجاه خطأ، حتى لو كان القائمون بالتجربة يرون في أنفسهم أنهم يرقون بالفعل لمنزلة عالية. الرقم «٦٠٠» يشير إلى حجم التجربة، فهي تتكون من ذراعين طول كل منهما ٦٠٠ متر وكل منهما يتعامد على الآخر في شكل حرف L. أُمِلي حجم الذراعين حسب الحيز المتاح، حيث الموقع فوق أرض زراعية جنوب هانوفر مباشرة تملكها ولاية بافاريا وتقوم جامعة هانوفر بتشغيلها كمركز للأبحاث الزراعية. الذراعان مبنيان بجانب طرق مزارع تفصل الحقول، بين محاصيل من الحبوب والفاكهة. أحد الذراعين يبرز في الحقيقة خارجًا عبر حد منطقة الأبحاث الزراعية، إلى أرض مزرعة مجاورة مسافة ٢٧ مترًا. ميزانية «جيو ٦٠٠» تدفع للمزارع مبلغ ٢٧٠ ماركًا سنويًّا كإيجار لاستفادتها منه.

يحوي كل ذراع في التجربة أنبوبًا قطره ٦٠ سنتيمترًا لا غير مصنوعًا من معدن مموج سمكه ٠,٨ من الملليمترات فقط. يوجد داخل الأنابيب فراغ خال مثل الفضاء، وهناك مرايا معلقة في الفراغ لتعكس ضوءًا يأتي من حزمة ليزر يضاء بطول الأنبوب. تزن كل مرآة ستة كيلوجرامات وهي معلقة بأربعة «أسلاك» مصنوعة من الزجاج وسمكها ٢٠٠ جزء من المليون من المتر. رتبت المنظومة كلها برهافة بالغة بحيث إنه بتحليل إشارات الضوء التي ترتد من المرايا بواسطة أشعة الليزر يتمكن الباحثون في النهاية من قياس أي تغيرات في طول كل ذراع من الكشاف لما يقل عن $١٠^{-١٨}$ من الأمتار (أي أقل من جزء من مليار من المليار من المتر، أو لجزء من المليون من قطر البروتون). في نهاية ٢٠٠٤ أخبرني جيم هوف رئيس الفريق البريطاني في جامعة جلاسجو، بأن نتائج هذا الاختبار وصلت حساسيتها إلى ما يقل عن هذا الهدف بما يقرب من عامل من عشرة (أي أنها بدقة تصل «فقط» إلى $١٠^{-١٧}$ من الأمتار)، وأن «جيو ٦٠٠» ينبغي أن يعمل بالحساسية المرسومة له بحلول نهاية ٢٠٠٦.

[٩] كلمة Ego مصطلح في علم النفس يعني الأنا، أو الذات، وفيه شحنة من الغرور. (المترجم)

وفقًا لنظرية النسبية العامة، ينبغي أن ينتج عن الموجات الجذبوية «بصمة» متميزة وهي تمر خلال التجربة، فتؤدي أولًا إلى مط أحد الذراعين بما يقرب من هذا المقدار وتضغط في الوقت نفسه الذراع الآخر، وبعدها تنعكس العملية. الأمر وكأن هناك زلزلة في الزمكان تجعلك معًا في نفس الوقت أكثر طولًا وأكثر نحولًا، ثم تنعكس لتجعلك أقصر طولًا وأكثر بدانة. هذا النمط المتميز من الأحداث هو الذي يجعل في الإمكان قياس هذه التغيرات الضئيلة. على أنه حتى منظومة «جيو ٦٠٠» لا تستطيع قياس طول أنبوب واحد مفرغ قياسًا بهذه الدقة، وإنما يستطيع العلماء قياس التغيرات النسبية في الذراعين بواسطة مقارنة الطريقة التي تتداخل بها حزم الليزر في ذراعي الجهاز إحداها مع الأخرى. إذا وجدت إشارة كهذه في «جيو ٦٠٠» في الوقت نفسه الذي تقاس فيه تغيرات مماثلة في كشاف «ليجو» أو أحد أجهزة الكشف الأخرى، فسيعرف الباحثون عندها أنهم قد رصدوا مرور موجة في الفضاء من خلال الأرض. عندما نتجاوز ما سيحدث من إثارة وإنفعال عند أول اكتشاف — وهو ما يمكن أن يحدث الآن في أي وقت — نجد أن رصد أحداث من هذا النوع في المستقبل سيوفر لنا تبصرًا نافذًا بالنسبة لأكبر انفجار في الكون، وربما يوفر تبصرًا نافذًا في طبيعة «الانفجار الكبير» نفسه.

يقول هوف إن هناك احتمالًا نسبته ٥٠ في المائة بأن «جيو ٦٠٠» سيلتقط إشارة من هذا النوع بحلول سنة ٢٠٠٩. إذا فشل في ذلك، فستكون الخطوة التالية هي الارتقاء بتجربة «ليجو» بوضع كشافات مؤسسة على التصميمات الرائدة «لجيو ٦٠٠» في التجربة الأكبر. (لدى ليجو ذراعان بطول ٤ كيلومترات، ولكن كشافاته أقل رقيًّا، وتعطيه ما يقرب من حساسية «جيو ٦٠٠» في وضعه الحالي). ثم يقول هوف أنه متأكد «بنسبة مائة في المائة» من أن الإشعاع الجذبوي سيتم الكشف عنه في العقد الثاني من القرن الحالي. أحد أسباب ثقته هذه أنه مهما كان ما سيحدث في التجارب المؤسسة فوق الأرض، فإن ناسا تجرى تجربة في الفضاء تعرف باسم «ليزا LISA» (وهو اختصار الكلمات Laser Interferometric Space Antenna الهوائيات الفضائية لقياس تداخل الليزر)، وهذه التجربة محدد لانطلاقها

سنة ٢٠١٢. ستتألف هذه التجربة من ثلاث سفن فضاء تطير في تشكيل في مدار حول الشمس، وكل منها تبتعد عن الأخرى بمسافة ٥ ملايين كيلومتر عند زوايا مثلث. هناك حزم ليزر تربط مجسات الفضاء الثلاثة ولها القدرة على قياس التغيرات في المسافات التي تفصلها، والتي تنتج عن فعل الموجات الجذبوية وهي تضغط وتمط الفضاء نفسه، وذلك بدقة تصل إلى ما يقرب من جزء من مائة ألف من المليون من المتر (١٠ بيكو متر).

في الوقت نفسه، فإنه بصرف النظر عن تقدم الأبحاث عن الإشعاع الجذبوي، فإن الأبحاث عن نظرية لكل شيء قد تلقت دفعة تعزيز لها في منتصف ثمانينيات القرن العشرين، عندما ثبت في النهاية أن إحدى فئات النماذج التي تم إنشاؤها دون أن توضع الجاذبية في الذهن، تتضمن أوتوماتيكيًّا بوزونات فيها كل الخصائص المناسبة لأن تكون حاملات التفاعل الجذبوي. نماذج «الأوتار» هذه هي حاليًّا أكثر النماذج إثارة عندما يصل الأمر إلى محاولة العثور على نظرية لكل شيء.

نشأت فكرة الأوتار جزئيًّا على ما لدى الفيزيائيين الرياضيين من اهتمام داخلي جوهري باللعب بالمعادلات، كما نشأت جزئيًّا عن مشكلة عملية جدًّا تصاحب كل النماذج التي تتعامل مع الجسيمات كنقط ليس لها نصف قطر أو حجم. المشكلة هي أنه في أوضاع كالوضع الذي يصف القوة الكهربائية مثلًا، على أنها في تناسب مع الواحد مقسومًا على مربع المسافة من الإلكترون، إذا كان الإلكترون بلا حجم، فإن المسافة يمكن أن تنخفض حتى الصفر. القسمة على صفر تعطينا نتيجة من لا نهاية، والمعادلات التي تعطي نتيجة من اللانهاية معادلات غير معقولة. التحايل على ذلك يكون باستخدام حيلة تسمى إعادة التطبيع، وفيها يحدث أن نقسم أساسًا إحدى اللانهائيات على الأخرى لنحصل على إجابة معقولة. نستطيع أن نجعل هذا ينجح نجاحًا مُرضيًا في النموذج المعياري وفي الديناميكا اللونية الكمومية، إلا أن هذا في الحقيقة ملاذ لا يُنصح باللجوء إليه إلا عند اليأس. هناك كثير من الفيزيائيين المرموقين، بما فيهم ريتشارد فينمان، يعتبرون أن إعادة التطبيع علامة على أن النماذج فيها خطأ شديد.

تعتبر نظرية الأوتار أن الكيانات الأولية التي يصنع منها العالم الفيزيقي مصنوعة من أشياء ممتدة — الأوتار — بدلًا من النقط. الأوتار

قد تكون مفتوحة وأطرافها حرة، أو هي مغلقة لتصنع حلقات حجمها بالغ الصغر. كما أنها، حسب النماذج، توجد بمقاييس تكون حتى أصغر من أي شيء نظرنا أمره حتى الآن — وبقدر ما يكون لفكرة الطول من معنى بهذه المقاييس، فإن طول الوتر يقرب من ١٠^-٣٣ سنتيمترًا. مقدار هذا الطول يقرب من جزء من المائة من مليار من المليار (أو ١٠^-٢٠) من نصف قطر البروتون، أو بطريقة أخرى لو كان عرض البروتون مائة من الكيلومترات، فسيكون الوتر بحجم البروتون. لا يوجد مطلقًا أي توقع لاختبار هذه الأفكار بالكشف عن الأوتار كشفًا مباشرًا، ومن ثم فإن فكرة الأوتار تظل قائمة أو تسقط بواسطة ما تصنعه من تنبؤات حول طبيعة العالم بمقياس أشياء مثل البروتونات. (على أن هذا قد يكون الموضع الملائم لأن نذكّر القارئ بأنه ليس من المهم ما إذا كان العالم مصنوع «حقًّا» من أوتار ضئيلة الحجم، وإنما المهم فقط ما إذا كان العالم يسلك «وكأنه» مصنوع من أوتار ضئيلة الحجم). هناك أمران بشأن نماذج الأوتار يجعلان منها حاليًّا موضوعًا ساخنًا مثيرًا: أولهما: أن إحدى فئات نماذج الأوتار لا تحتاج إلى إعادة التطبيع، أو الأولى أن النماذج فيما يبدو تعيد تطبيع نفسها أوتوماتيكيًّا، دون مساعدة من الرياضيين، اللانهائيات تُلغَى كلها بنفسها. النقطة الثانية — وهي الأهم كثيرًا في أعين معظم الفيزيائيين — هي: أن نماذج الأوتار تتضمن الجرافيتون. كان الأمر مفاجئًا. المنظرون الذين كان لهم دور في اللعب بنظرية الأوتار في ثمانينيات القرن العشرين لم ينطلقوا بعيدًا بالتفكير جديًّا بشأن الجاذبية (وإن ظلت فكرة نظرية كل شيء وهي باقية دائمًا في الخلف من عقولهم)، وكان هؤلاء المنظرون يصابون بالحيرة والانزعاج معًا عندما يجدون أنهم حتى يجعلوا معادلاتهم متوازنة، فإن نماذجهم تتطلب وجود جسيم لا يتلاءم مع متطلبات النموذج المعياري وقد أضيفت إليه النظريات الموحدة الكبرى. عندما تفهموا الأمور، وأدركوا أن هذا الجسيم هو الجرافيتون، حدث انطلاق كرحلة طائرة للموضوع كله. على أن رحلة الطيران التي انطلقت بهم هكذا تبدو رحلة عجيبة بالنسبة للغرباء عن الأمر.

الثمن الذي يجب أن يُدفع لنجاح نظرية الأوتار هو أن نتقبل فكرة وجود أبعاد إضافية للمكان (الفضاء) تتجاوز وتزيد عن الأبعاد الثلاثة

المكانية (أمام–خلف، وأعلى–أسفل، ويسار–يمين) مضافًا إليها البعد الرابع، أي الزمان، وهي كلها الأبعاد التي نلقاها في الحياة اليومية. من الغريب أن هذه الفكرة ترجع إلى عشرينيات القرن العشرين، عندما كان الفيزيائيون يعرفون أمر نوعين فقط من التفاعل، الجاذبية والكهرومغناطيسية. بدا لفترة وجيزة، استمرت حتى تعيين التفاعلات النووية، وكأن إضافة بُعد خامس ستوفر في عشرينيات القرن العشرين ما يساوي نظرية لكل شيء، وذلك بتوحيد هذين التفاعلين، إلا أن الفكرة أهملت عندما تم اكتشاف المزيد من التفاعلات، ولم يعاود أحد إحياء هذه الفكرة إلا بعد مرور نصف قرن.

تقفز هذه الفكرة خارجة من نظرية أينشتاين عن النسبية العامة التي تصف الجاذبية بأنها تشوهات في نسيج الزمكان ذي الأبعاد الأربعة. في ١٩١٩ تساءل تيودور كالوزا الرياضي الألماني الشاب عما ستبدو عليه معادلات أينشتاين إذا كُتبت بتوسع لتصف تشوهات في زمكان له خمسة أبعاد. لم يكن لديه أي سبب للتفكير في أن معادلات كهذه ستعني أي شيء فيما يختص بالعالم الفيزيقي؛ كان فحسب يستكشف هذا الإمكان من باب الفضول الرياضي. ووجد أن صورة النسبية العامة ذات الأبعاد الخمسة مصنوعة من مجموعتين من المعادلات؛ المعادلات المألوفة لنظرية النسبية العامة نفسها، ومجموعة من معادلات مألوفة أكثر تشابه بالضبط معادلات ماكسويل عن الكهرومغناطيسية. بتبسيط موجز، إذا كان يمكننا التفكير في الجاذبية كتموج في زمكان له أربعة أبعاد، فإنه يمكننا التفكير في الكهرومغناطيسية كتموج في زمكان له خمسة أبعاد. طُورت الفكرة لأبعد، لتتضمن أفكارًا من نظرية الكم، وذلك بواسطة أوسكار كلاين الفيزيائي السويدي، وأصبحت معروفة باسم نموذج كالوزا–كلاين. تنجح الرياضيات هنا نجاحًا كاملًا؛ فالعقبة الوحيدة أنه لا يوجد أثر لأي بعد خامس (أي لبعد «مكاني» رابع) في حياتنا اليومية. إلا أن الفيزيائيين يتحايلون على ذلك باستخدام حيلة تسمى التدميج Compactification.

أفضل طريقة لفهم التدميج هي بواسطة أحد الأمثلة. إذا كان هناك ملاءة رفيعة من مادة مرنة كالمطاط فإنها تكون فعلًا شيئًا له ثلاثة أبعاد، ولكنها من مسافة بعيدة ستبدو وكأنها ببعدين اثنين لأن سمكها لا يظهر

للعيان. سنزعم بهدف ضرب المثل أن هذه الملاءة هي حقًّا ببعدين اثنين. يمكننا أن نأخذ الأمر لمرحلة أبعد بأن نلف الملاءة لتصنع أنبوبًا، حروفه ملتصقة معًا. ستكون الملاءة ذات البعدين ملفوفة حول البعد الثالث، وإذا نظرنا إليها من مسافة أبعد حتى مما سبق فستبدو الآن وكأنها خط ببعد واحد. إلا أن كل «نقطة» على الخط هي حقًّا دائرة صغيرة، أو حلقة حول الأنبوب، ويمكن أن تنطلق تموجات في البعد الثاني (ما يمكن أن نسميه البعد لأعلى-أسفل) وتنطلق أعلى وأسفل الأنبوب حتى وإن كنا لا نستطيع رؤيتها — وهي تموجات تحمل طاقة، ومن ثم فإنها تؤثر في سلوك الخط كله. أحد البعدين الاثنين للملاءة مخبوء عنا لأنه ببساطة أصغر من أن يرى، ولكنه لا يزال يجعل تأثيره محسوسًا. بطريقة مماثلة، نجد في نموذج كالوزا-كلاين الأصلي أن البعد الرابع للمكان يمكن تصوره بتخيل أن كل نقطة في زمكان بأربعة أبعاد هي حقًّا حلقة صغيرة، عرضها فقط $١٠^{-٣٢}$ سنتيمترًا، وقد حُنيت لتلف فيما حولها في بعد خامس.

بدا على الأقل بالنسبة لبعض الفيزيائيين، أن هذا ثمن نتقبل دفعه للحصول على مجموعة واحدة من المعادلات لوصف كل تفاعل معروف. بلغة الكم نجد أن نموذج كالوزا-كلاين بسيط نسبيًّا لأن عليه أن يتعامل مع بوزونين فقط: الجرافيتون، والفوتون. ولكن سرعان ما عُرف المزيد من التفاعلات الأكثر تعقيدًا. حتى تشمل الحزمة التفاعل القوي والتفاعل الضعيف بكل بوزوناتهما فإن هذا يتطلب المزيد من الأبعاد تكون ملفوفة بطرائق أكثر تعقيدًا، وكان هذا ببساطة يزيد عما يمكن تقبله في ذلك الوقت، ومن ثم فإن نموذج كالوزا-كلاين أصبح لا يزيد عن أن يكون تحفة غريبة، بينما النموذج المعياري يزداد تناميًا. إلا أنه نشأ لاحقًا جيل من الفيزيائيين الرياضيين أصبحوا أكثر تقبلًا لهذه الطريقة للمقاربة[١٠] بالأبعاد المتعددة، وبحلول ثمانينيات القرن العشرين أصبح من الواضح أن هناك حاجة إلى طريقة مقاربة مختلفة اختلافًا عنيفًا للانتقال من النموذج

---

[١٠] هذا أمر معتاد في العلم؛ ففي وقت ما قيل إن نظرية النسبية العامة لا يفهمها إلا ثلاثة رجال، والآن تدرس هذه النظرية لطلبة الجامعة. الأفكار الثورية عند أحد الأجيال تصبح أفكارًا عادية للجيل التالي.

المعياري إلى نظرية لكل شيء. هذه المقاربة الجديدة تجمع بين فكرة الأوتار وفكرة الأبعاد الإضافية.

حلقات الأوتار البالغة الصغر التي وصفناها فيما سبق يُنظر إليها في شكلها الحديث في القرن الحادي والعشرين على أنها ملفوفة في أبعاد يبلغ مجموعها الكلي ستة وعشرين بعدًا. الأشياء المختلفة التي تعودنا على أن نفكر فيها كجسيمات (الإلكترونات، والجلونات، وما إلى ذلك) تناظر الذبذبات المختلفة للأوتار، التي تحمل كميات مختلفة من الطاقة، بما يشابه وجود ذبذبات مختلفة لوتر الجيتار تناظر النغمات الموسيقية المختلفة. يمكننا تفسير الفرميونات بطريقة بسيطة نسبيًّا، بلغة من ذبذبات في عشرة أبعاد تجري في اتجاه واحد حول حلقات من الأوتار. ستة من هذه الأبعاد متدامجة، لتترك جانبًا الأبعاد الأربعة المألوفة للمكان-الزمان. على أن ثراء عالم البوزونات يتطلب ذبذبات في ستة وعشرين بعدًا، تجري في الاتجاه الآخر حول حلقات الأوتار. هناك ستة عشر بعدًا من هذه الأبعاد مطلوبة لتفسر التنوع الثري للبوزونات، وهذه الأبعاد تتدامج كمجموعة بحيث إنها بمعنى ما تكون «في الداخل» من الأوتار ذات الأبعاد العشرة. ليس هناك من هو متأكد تمامًا مما يعنيه هذا بالضبط، ويتناقش المنظرون حول ما إذا كانت هذه الأبعاد «حقيقية». على أنه من وجهة نظرنا الأمر المهم هو أن البوزونات تسلك «وكأنها» عندها هذه الأبعاد الإضافية مصاحبة لها. الأبعاد العشرة الأخرى تماثل تلك التي تحدث فيها الذبذبات الفرميونية. تتدامج ستة من هذه الأبعاد بحيث ينتج عن الأوتار المتذبذبة مظهر جسيمات تتحرك في الزمكان ذي الأبعاد الأربعة. يتطلب النموذج وجود مجموعتين مختلفتين من الذبذبات تحدث فوق نوع حلقة واحد، ولهذا السبب فإنه يشار إليه أحيانًا على أنه نظرية الأوتار المهجنة.

ثمة شيء إضافي غريب حول هذا الأمر، فيه ما يلقي ضوءًا كاشفًا على فهمنا غير المكتمل للأبعاد الستة عشر «الإضافية». من الممكن فعلًا وصف الجسيمات كلها بلغة من ثمانية من الستة عشر بعدًا المتدامجة، بما يترك متسعًا لمجموعة من نسخة مطابقة من الجسيمات. لا أحد يعرف تمامًا ما يعنيه ذلك بدوره، إلا أن بعض المنظرين يخمنون أنه ربما يكون هناك

«كون شبحي» كامل مصنوع من هذه النسخة المطابقة من الجسيمات، وهو يتشارك مع زمكاننا ذي الأبعاد الأربعة ولكنه لا يتفاعل معنا، إلا فيما يحتمل بالجاذبية. يستطيع شخص شبحي أن يمشي من خلالك مباشرة دون أن تلحظ أنت ذلك. ولكننا سنترك المزيد من التخمين على هذه الوتيرة لمؤلفي روايات الخيال العلمي. حدث تقدم حقيقي في نظرية الأوتار في السنوات الأخيرة أتى من إعادة تفسير الجزء الآخر من النموذج، الجزء المكون من عشرة أبعاد.

حتى الآن تحدثنا عن نظرية الأوتار بصيغة المفرد، وكأن هناك نموذجًا واحدًا لا غير يتلاءم مع النظرية. هذه هي اللغة المتفائلة التي يستخدمها منظرو الأوتار أنفسهم، إلا أنه في السنوات العشر من منتصف الثمانينيات إلى منتصف التسعينيات من القرن العشرين كان هذا يخفي وراءه حقيقة مربكة. كان هناك (ولا يزال هناك) بالفعل خمسة نماذج مختلفة، تنويعات على لحن الأوتار، كل منها يطرح تفسيرًا لما يجري يختلف اختلافًا حاذقًا رهيفًا، ولكنها كلها تتضمن ستة أبعاد متدامجة لوتر يتذبذب متحركًا في زمكان بأربعة أبعاد (يضاف إليها الأبعاد البوزونية الإضافية الستة عشر التي لا يفهمها أحد فهمًا مناسبًا). لم يكن في هذا ما يزعج الفيزيائيين بمثل ما قد يظنه القارئ، ذلك لأنهم تمكنوا من أن يبرهنوا رياضيًّا على أن هذه هي النماذج «الوحيدة» الممكنة — يمكن للفيزيائيين أن يحلموا بصور رياضية لنماذج للأوتار من أنواع أخرى، ولكنهم يستطيعون أن يبينوا أن كل هذه النماذج ذات لانهائيات لا يمكن إعادة تطبيعها وليس لها أي معنى على الإطلاق.

هناك أيضًا ما يشبه ورقة «الجوكر» في رزمة أوراق اللعب — نسخة واحدة من نوع نموذج آخر يسمى الجاذبية الفائقة، بدا أنه يفسر الأمور كأي من نماذج الأوتار الخمسة، ولكنه يتطلب وجود أحد عشر بعدًا بدلًا من عشرة. ثبت في النهاية أن حقيقة أن الجاذبية الفائقة تنجح فقط في أحد عشر بعدًا ليست فيها نزوة غريبة، وإنما فيها مفتاح مهم لتفسير ما يجري.

بعد جهود هائلة لمنظرين كثيرين في السنين الأولى من تسعينيات القرن العشرين أخذ إد ويتن الفيزيائي الأمريكي يشد كل الخيوط معًا بأن

أضاف بعدًا إضافيًّا لنظرية الأوتار. وأوضح أن كل النظريات الست المرشحة لنظرية لكل شيء هي أوجه مختلفة لنموذج أساسي واحد Master أسماه نظرية إم الكهرومغناطيسية والتفاعل الضعيف يبدوان كشيئين مختلفين عند الطاقات المنخفضة، ولكنهما في الحقيقة مظهران مختلفان لتفاعل واحد هو الكهروضعيف، وبمثل ذلك تمامًا فإن النظريات الست المرشحة لأن تكون نظرية لكل شيء هي مظاهر عند الطاقة المنخفضة لنظرية واحدة هي نظرية إم وهي مظاهر لا تظهر تجريبيًّا إلا إذا تمكنا من توليد طاقات تساوي طاقات التفاعل القوي. الثمن الذي كان على ويتن أن يدفعه للنجاح هو أن يُدخل بعدًا إضافيًّا للمكان على نماذج الأوتار، بحيث إنها ستعمل، مثل الجاذبية الفائقة، في مكان-زمان ذي أحد عشر بعدًا. وجود بعدٍ آخر متدامج بالغ الصغر قد لا يبدو كثيرًا كخطوة للأمام عندما يكون لدينا من قبل ستة منها، ولكن هذا البعد «الجديد» في نظرية إم ليس عليه بأي حال أن يكون بالغ الصغر، فمن الممكن أن يكون كبيرًا جدًّا، وإن كان مع ذلك لا يمكن الكشف عنه، لأنه يقع باتجاه عمودي بالنسبة لكل الأبعاد الثلاثة المألوفة للمكان. الكائن الذي له أصلًا بعدان ويقيم في عالم ذي بعدين سيكون غير مدرك للبعد الثالث،[11] وبالطريقة نفسها فإننا نحن كائنات الأبعاد الثلاثية لا ندرك هذا البعد الرابع (أو العاشر!) للمكان.

الطريقة التي يغير بها ذلك من صورتنا الذهنية عما يجري هي أننا بدلًا من التفكير في الجسيمات على أنها مما يمكن الكشف عنه من النتائج المترتبة على أوتار متذبذبة، بدلًا من هذا علينا أن نفكر بلغة من صفحات Sheets متذبذبة، أو أغشية متذبذبة. ولهذا السبب، فإنه على الرغم من أن ويتن لم يحدد أبدًا ما يرمز له حرف إم في نظرية إم، فإنه بالنسبة لأفراد كثيرين يرمز الحرف لكلمة Membrane (الغشاء). وبطريقة أكثر فنية، فإن الصفحة ذات البعدين تسمى two-brane، بران-اثنان، وهذه النماذج يوجد فيها بنى مرادفة (وإن كان تصورها أصعب) لكل الأبعاد حتى عشرة أبعاد، تعرف باسم تصنيفي شامل هو برانات-بي p-branes

[11] وصف إدوين أبوت هذا الموقف وصفًا ممتعًا في مؤلفه الكلاسيكي «الأرض المسطحة» Flatland (١٨٨٤)، كما وصفه إيان ستيوارت عندما أعاد حديثًا صياغة هذه الحكاية.

حيث p يمكن أن تكون أي عدد صحيح أقل من عشرة. هكذا يكون أحد الأوتار «بران-واحد one-brane».

إحدى النتائج التي تترتب على هذا كله هي أن كوننا بأسره يمكن أن يكون بران-٣ مطمورًا في أبعاد أكثر. ينشأ عن هذا احتمال أنه يمكن أن توجد أكوان أخرى ذات أبعاد ثلاثة بجوارنا مباشرة، مطمورة أيضًا في أبعاد أكثر، ولكنها مما لا يمكننا تمامًا التوصل إليه، على نحو يشبه أنك يمكنك أن تعتبر أسطح صفحات أحد الكتب كسلسلة من أكوان من بعدين، كل واحد منها يجاور الآخر مباشرة، ولكن كل منها يبدو لأي كائنات ذات بعدين تقيم فيه أنه كل العالم بأسره.

تأخذنا هذه الأفكار إلى عالم من التخمين، وإن يكن تخمينًا له احترامه، لكن ليس هناك أي توقع مباشر لاختبارها في أي تجربة أو معجل يمكننا أن نبنيه فوق الأرض. إلا أن لدينا بالفعل طريقة للتوصل إلى معلومات من حدث كانت الظروف فيه بالغة التطرف، بحيث إن تأثير عمليات نظرية إم، والأوتار والأغشية؛ ربما يكون قد ترك علامة مميزة. يُطرح في أحسن فهم لنا للعالم الذي نعيش فيه أنه قد انبثق من حالة متطرفة من ارتفاع الضغط والحرارة، في انفجار كبير منذ ما يقرب من ١٤ مليار سنة. وصلت الأرصاد الفلكية الآن إلى دقة بالغة حتى إن العلماء يستطيعون استخدام هذه البيانات لاختبار بعض تنبؤات نظرية الجسيمات عما حدث في الانفجار الكبير نفسه. علم الفلك وعلم فيزياء الجسيمات قد اندمجا ليصيرا علم فيزياء الجسيمات الفلكية. إذن فإن الخطوة المنطقية التالية في سبر سلوك المادة وهي في أصغر المقاييس هو أن نتطلع خارجًا في الفضاء إلى سلوك المادة وهي في أكبر المقاييس كلها، مقياس الكون نفسه، وأن نبحث من أين أتى هذا كله.